



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

가스연료 추진선박용 연료공급시스템의 운전특성에 관한 연구

A Study on Operation Characteristics of Gas Supply
System for Gas Fuelled Ship

지도교수 조 권 희



한국해양대학교 해사산업대학원

기관시스템공학과

정 문 화

本 論文을 정문화의 工學碩士 學位論文으로 認准함

위원장 최 재 성 (인)

위 원 조 권 회 (인)

위 원 강 호 근 (인)



2016년 2월

한국해양대학교 해사산업대학원

목 차

List of Figures	iii
List of Tables	v
Abstract	vi
 제 1 장 서 론	 1
 제 2 장 배기가스 저감기술 동향	 4
2.1 배기 배출물 생성기구	4
2.2 질소산화물 저감 기술	6
2.2.1 질소산화물에 대한 배출 기준	6
2.2.2 질소산화물 주요 저감 기술	7
2.3 황산화물 저감 기술	13
2.3.1 황산화물에 대한 배출 기준	13
2.3.2 황산화물 주요 저감기술	13
2.3.3 스크러버(scrubber) 시스템	13
2.4 이산화탄소 저감 기술	16
2.4.1 이산화탄소 배출기준	16
2.4.2 이산화탄소 저감기술	18
2.4.3 선박에서의 이산화탄소 저감기술	18
2.4.4 엔진에서의 이산화탄소 저감기술	20
 제 3 장 가스연료 선박 시스템 고찰 및 국제해사기구 주요 설계 요구사항	21
3.1 가스연료 추진선박 개발 배경	21
3.2 가스연료 추진 시스템 구성요소	29
3.2.1 가스연료 엔진(Gas fuelled engines)	29
3.2.2 저압 분사 방식 엔진	30
3.2.3 고압 분사 방식 엔진	30

3.2.4 가스 연료 시스템 개요	31
3.2.5 가스 연료 시스템 구성 요소	32
3.3 가스 연료 공급 시스템의 문제점 및 과제	35
3.4 국제해사기구 주요 설계 요구사항	37
3.4.1 개요	37
3.4.2 기관실 안전 개념 및 설계 기준	37
3.4.3 가스 기관구역내의 가스공급시스템	40
3.4.4 연료저장 시스템	43
3.4.5 기관구역 밖의 연료 병커링 시스템 및 분배시스템	51
제 4 장 가스공급 시스템 운전특성 연구	53
4.1 가스연료 선박용 가스공급시스템	53
4.2 시스템 운전해석 및 안전성 평가	56
4.2.1 대상 선박 및 LNG 연료 선정	56
4.2.2 시스템 공정을 위한 초기조건	58
4.2.3 시스템 특성 분석	60
4.2.4 대상선박 부하별 예상 속도산출	62
4.2.5 대상선박의 가상 해상 시뮬레이션	63
제 5 장 결 론	74
참고문헌	76

List of Figures

Fig. 1.1	IMO requirement for NO _x , SO _x and CO ₂	2
Fig. 2.1	Flow process and typical exhaust gas composition	5
Fig. 2.2	Typical exhaust gas composition(sulfur content 3%)	5
Fig. 2.3	MAN Diesel EGR system	9
Fig. 2.4	SCR system process	10
Fig. 2.5	LP SCR system process	11
Fig. 2.6	HP SCR system process	12
Fig. 2.7	Wartsila open loop scrubber system	14
Fig. 2.8	Wartsila close loop scrubber system	15
Fig. 2.9(a)	EEDI reference line for tanker	17
Fig. 2.9(b)	EEDI reference line for tanker	17
Fig. 2.10	Typical thermal efficiencies of prime movers	20
Fig. 3.1(a)	Comparison between LNG and HFO/MGO	21
Fig. 3.1(b)	Comparison between LNG and FO	22
Fig. 3.2	LNG ferry Bergensfjord	23
Fig. 3.3	Viking Princess	24
Fig. 3.4	Viking line 2800 pax cruise ferry	24
Fig. 3.5	Econuri(Korea)	25
Fig. 3.6	Econuri propulsion system	25
Fig. 3.7	Operating principle for Dual fuel diesel engine	30
Fig. 3.8	Principle diagram for LNG fuel supply system	32
Fig. 3.9	High pressure pump	33
Fig. 3.10	Gas heater	33
Fig. 3.11	14,000 TEU container ship	36
Fig. 3.12	Concept for gas safe machinery space	38
Fig. 3.13	Concept for ESD protected machinery space	39
Fig. 3.14	Typical gas fuel supply system	42

Fig. 3.15 Prismatic tank–courtesy of IHI marine united inc.	45
Fig. 3.16 Prismatic tank construction	45
Fig. 3.17 generic membrane tank	50
Fig. 3.18 GTT No.96 membrane tank	50
Fig. 3.19 Schematic bunkering arrangement	52
Fig. 4.1 Diagram of high pressure gas supply system	54
Fig. 4.2 High pressure gas supply system of STX(FusionTM)	55
Fig. 4.3 High pressure gas supply system of DSME	55
Fig. 4.4 Diagram of low gas supply system	55
Fig. 4.5 Low pressure gas supply system of TGE	55
Fig. 4.6 Low pressure gas supply system of SHI(FuGas)	55
Fig. 4.7 Diagram of low pressure fuel supply system	58
Fig. 4.8 Low pressure DF engine system by HYSYS	60
Fig. 4.9 Propeller curve	62
Fig. 4.10 Fuel supply system characteristic curve in Incheon port	64
Fig. 4.11 Fuel supply system characteristic curve in Incheon port (From Incheon to Gunsan)	67
Fig. 4.12 Fuel supply system characteristic curve(GVU shut down)	69
Fig. 4.13 Fuel supply system characteristic curve(100% Load)	71
Fig. 4.14 Fuel supply system characteristic curve(75% Load)	72

List of Tables

Table 2.1	NOx reduction treatment for marine diesel engine	8
Table 2.2	Reduction technology of green house gas	19
Table 3.1	Econuri specification	26
Table 3.2	Reference and order lists for LNG fuelled ship	27
Table 3.3	Comparison for gas fuelled engine	29
Table 3.4	Comparison table for IMO type tank	34
Table 4.1	Fuel gas consumption	56
Table 4.2	Pilot oil consumption	57
Table 4.3	Qatar LNG composition	57
Table 4.4	Design criteria and purpose of low pressure DF engine	59
Table 4.5	Initial criteria of fuel supply system	59
Table 4.6	Estimated econuri vessel speed by propeller curve	62
Table 4.7	Summary of operation status at case 1	65
Table 4.8	Summary of operation status at case 2	66
Table 4.9	Summary of operation status at case 3	68
Table 4.10	Summary of operation status at 100% load	73
Table 4.11	Summary of operation status at 75% load	73

A Study on Operation Characteristics of Gas Supply System for LNG Fuelled Ship

Mun-Hwa Jung

Department of Marine System Engineering
Graduate School of Maritime Industrial Studies
Korea Maritime and Ocean University

Abstract

After the industrial revolution, air pollutant exhausted to the earth due to a lot of usage of fossil fuel has seriously affected the global environment and humans. According to increase of concentration of green house gas such as CO₂ and methane in the atmosphere, the average temperature of surface of the earth has been increased gradually. IMO adapted Regulations in Annex VI - Prevention of Air Pollution from Ships (applicable from May 19th, 2005) sets limits to the emission of harmful pollutants such as sulphur oxide(Regulation 13), nitrogen oxide(Regulation 14) and particulate matter(PM). The IMO provides a provision for nations to specify areas with more stringent exhaust limits compared to MARPOL Annex VI. These areas are designated as Emission Controls Areas (ECAs).

In order to reduce CO₂ as main source of global warming, IMO MEPC adapted EEDI(Energy Efficiency Design Index for new ships) and SEEMP(Ship Energy Efficiency Management Plan) as technical and operational measures to MARPOL Annex VI for inclusion of regulations on energy efficiency for ships (resolution MEPC.203(62)) in August 2011. The Energy Efficiency Operational Index (EEOI) has been introduced as IMO's

initiative for monitoring fuel consumption and CO₂ emissions (CO₂-Index) for ships in operation.

From an environmental point of view, natural gas has many benefits. As it contains no sulphur, it doesn't produce any SO_x emissions. Since it is a gas fuel, there are almost no particles produced in the combustion process as well. When natural gas is burned in a low pressure lean burn engine, NO_x emissions are reduced by up to 90% compared to oil fuelled engines. When natural gas is burned in a high pressure dual fuel engine, NO_x emissions are reduced by about 13% compared to operating the same engine with fuel oil. CO₂ emissions are also reduced when natural gas is burned instead of burning fuel oil with equivalent energy content, due to the optimal carbon to hydrogen ratio of natural gas. As one of measures to meet IMO requirement on NO_x, SO_x and CO₂, Shipyards and manufacturers have been developing LNG fuelled ship with LNG fuel supply system. Some shipyards in Korea have developed LNG fuelled ship and the engines and fuel supply system with LNG as a fuel have been installed on board.

In this study, the fuel gas supply system for gas fuelled ship has been studied and the operational characteristics such as gas pressure, gas temperature, flow quantity and tank capacity for four different operation cases using HYSYS simulation program on Econuri ship in operation with gas fuelled propulsion system has been investigated. And system stability for gas fuel supply ship has been assessed.

KEY WORDS: LNG propulsion ship 가스 추진 선박; Fuel gas supply system 연료가스공급시스템; Econuri 에코누리호; DF engine, 이중연료엔진; Operational characteristics 운전특성

제 1 장 서 론

산업혁명 이후 대량의 화석연료를 사용함에 따라 지구상에 많은 대기오염물질이 방출되어 지구 환경 및 인체에 나쁜 영향을 미치고 있고, 대기 중 이산화탄소, 메탄가스 등의 온실가스(Green House Gas) 농도가 증가함에 따라서 지구 표면의 평균 온도가 점차 상승하고 있다. 국제해사기구(IMO)에서는 대기오염 방지를 위해서 오래전부터 대기오염 물질 방출 기준을 정해서 강제화하였고(2005.5.19., MARPOL Annex VI), 지구 온난화 주범 물질인 이산화탄소 절감을 위한 기준도 2013년 1월1일에 발효된 상태이다. 또한 대기오염 관련 물질인 질소산화물 및 황산화물에 대해서는 단계별, 지역별로 나눠서 규제를 강화하고 있는 실정이다.

질소산화물에 대한 규제 내용을 살펴보면, 2000년 1월1일 이후에 선박에 설치되는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤기관과 주요 개조가 이루어지는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤 기관에 적용된다.

Fig. 1.1 에 언급된 바와 같이 단계별로 질소산화물(NOx) 규제치가 나타나 있다. Tier III 요구 사항은, 2016년 1월1일 이후에 건조되는 선박으로 미국 ECA(Emission Control Area)에서 항해하는 선박에 적용되며, 그 외 지역에서 항해하는 선박은 Tier III는 적용하지 않는다.

황산화물(SOx)에 대한 국제해사기구 규제 내용을 살펴보면, SECA(SOx emission control area)에서는 2015년 1월1일부터 모든 선박에 대해서 황 함유량 0.1% 이하의 연료를 사용해야 한다. 이 지역 이외에서 항해하는 선박은 황 함유량 3.5% 이하의 연료를 사용해야 한다. 2020년부터는 황 함유량 0.5% 이하의 연료를 사용하도록 규제할 예정이다.

Fig. 1.1에 전해역(global), ECA에 대한 규제 내용을 간략하게 정리하였다.

Control Matters	Regulation	Control Area	Year										Remarks
			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
NO _x	MARPOL Annex VI Regulation 13	ECA	14.4 g/kWh, n<130 Tier II				3.4 g/kWh, n<130 Tier III						Based on Keel Laying date of New Vessel
		GLOBAL	14.4 g/kWh, n<130 Tier II										
SO _x	MARPOL Annex VI Regulation 14	ECA	1.00 %S		0.10 %S								Sulfur contents 0.50% in the fuel to be reviewed in 2018
		GLOBAL	3.50 %S							0.50 %S			
CO ₂ (EEDI)	MARPOL Annex VI	ECA/ GLOBAL	Phase 0		10% reduction from Phase 0 Phase 1				10% reduction from Phase 1 Phase 2				

Fig. 1.1 IMO requirement for NO_x, SO_x and CO₂^[1]

지구 온난화 주범인 이산화탄소 절감을 위해서 2011년 8월 국제해사기구는 해양환경위원회(MEPC) 62차 회의에서 선박 에너지효율 향상을 위한 기술적, 운항적 조치 방안으로 신조선 에너지 효율지표(EEDI, Energy Efficiency Design Index for new ships)와 선박 에너지 효율관리계획(SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan)을 채택하였다. EEDI는 2013년 1월 1일 이후에 건조되는 특정 선박에 대해서 적용되며, 선박의 크기 및 종류에 따라 탄소배출 허용기준이 마련되어 있으며, Phase 0, phase 1, phase 2, phase 3, 즉 4단계로 나누어 이산화탄소 배출 기준을 강화할 예정이다. 단계별로 선종에 따라 차이는 있지만 단계별로 약 10%씩 절감을 해야 하고, 마지막 단계인 phase 3에서는 현재 기준 대비 약 30%까지 절감을 해야 한다.

국제해사기구에서 요구하는 질소산화물, 황산화물 및 이산화탄소 배출 기준을 만족하기 위한 여러 장비, 선형 및 시스템 기술 개발이 현재 활발히 진행 중에 있으며, 일부 기술은 실제 선박에 적용 중에 있다.

여러 가지 기술 중에 가스연료 추진선박 시스템은 가스를 엔진의 연료로 사용하여 질소산화물, 황산화물 및 이산화탄소를 절감할 수 있는 중요한 기술이다. 현재 대우조선해양에서 천연가스 운반선에 가스연료 추진 시스템이 탑재되

어 건조 중에 있고, 현대 삼호 중공업에서는 천연가스 운반선 및 컨테이너 선박에 가스연료 추진 시스템이 적용되어 건조 중에 있고, APSI 조선소에서 3,600 TEU 컨테이너 선박에 가스연료 추진 시스템이 적용되어 2017년 인도 될 예정이다. 가스연료 추진 시스템을 선박에 적용하는 것은 문제없는 것으로 판단되나, 현재 적용 선박의 장시간 운전 실적이 없어서 가스 공급 시스템이 여러 운전 조건에서도 안정적으로 운전이 가능한지에 대한 초기 검토 및 운전 자료를 확보할 필요가 있다. 대형 가스 연료 추진 선박을 운용하기 위해서는 LNG를 수급할 수 있는 인프라, 즉 LNG 벙커링 선박, LNG 터미널이 구축되어야 한다. 세계적으로 주요 도시에 LNG 벙커링 관련 인프라를 구축하고 있으며, 한국에서는 평택, 통영, 인천 등에 LNG 공급 기지를 건설 하였다. 중소형 가스 연료 추진 선박의 경우에 대해서도 선박의 운항 패턴에 맞는 벙커링 설비가 구축되어야 하며, 유럽에서 운항중인 여객선의 경우, 트럭을 이용하거나 LNG 벙커링 선박으로부터 공급을 받고 있고, 국내 유일의 가스 연료 추진 선박인 에코누리호의 경우, LNG를 트럭을 이용해 공급받고 있다.

본 연구에서는 가스연료 추진선박 시스템을 고찰하고, 현재 국내에서 유일하게 운항중인 가스연료 추진 선박(에코누리호)의 4가지의 운항 패턴에 따른 운전 특성, 즉 시스템의 압력, 온도, 유량 및 탱크 용량 변화 등을 시뮬레이션 프로그램인 HYSYS를 이용하여 안정성을 평가하고자 한다. 또한, LNG를 추진 연료로 사용하는 선박은 운항 가능 지역에 적절한 LNG 벙커링 설비가 확보되어야 하나, 현재 충분한 인프라가 구축되어 있지 않은 실정이다. 이에 따라 에코누리호의 안정적인 운항을 위해서 적절한 벙커링 시점을 예측할 필요가 있음에 따라 이에 대한 평가를 하고자 한다.

제 2 장 배기 가스 저감기술의 동향

2.1 배기 배출물 생성기구

기본적으로 디젤엔진의 연소는 공기 중의 산소(O_2)가 연료속의 탄소(C), 수소(H) 및 유황(S)과 반응하여 이산화탄소(CO_2), 물(H_2O)과 이황산가스(SO_2)를 생성한다. 그리고 공기 중의 질소(N_2)는 흡입 공기 중에 존재하고 있는 수증기나 과잉산소가 하는 것처럼 냉각제로서 엔진을 통과하며, 배기가스 중에 부가적으로 생성되는 대기오염물질은 질소산화물(NO_x), 미연 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 검댕(soot) 등이 있다.

Fig. 2.1은 MAN Diesel사에서 제작한 선박용 엔진의 전형적인 배기배출물의 조성을 나타내고 있는데, 연료와 소량의 윤활유가 기관내의 공기 중에서 연소되어 열에너지를 발생시키고, 동력장치를 통해 열에너지를 기계적 에너지로 전환시키며, 유해성 배기가스(NO_x , SO_x , HC, PM)를 배출하는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.2는 평균 3%의 황성분을 갖는 연료를 연소하는 중속 디젤엔진의 전형적인 배기가스 생성물의 성분을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체 배기 배출물의 약 6% 정도가 CO_2 이고, 배기 배출물의 오염물질은 단지 0.3%를 차지하는 것을 알 수 있다.^[2]

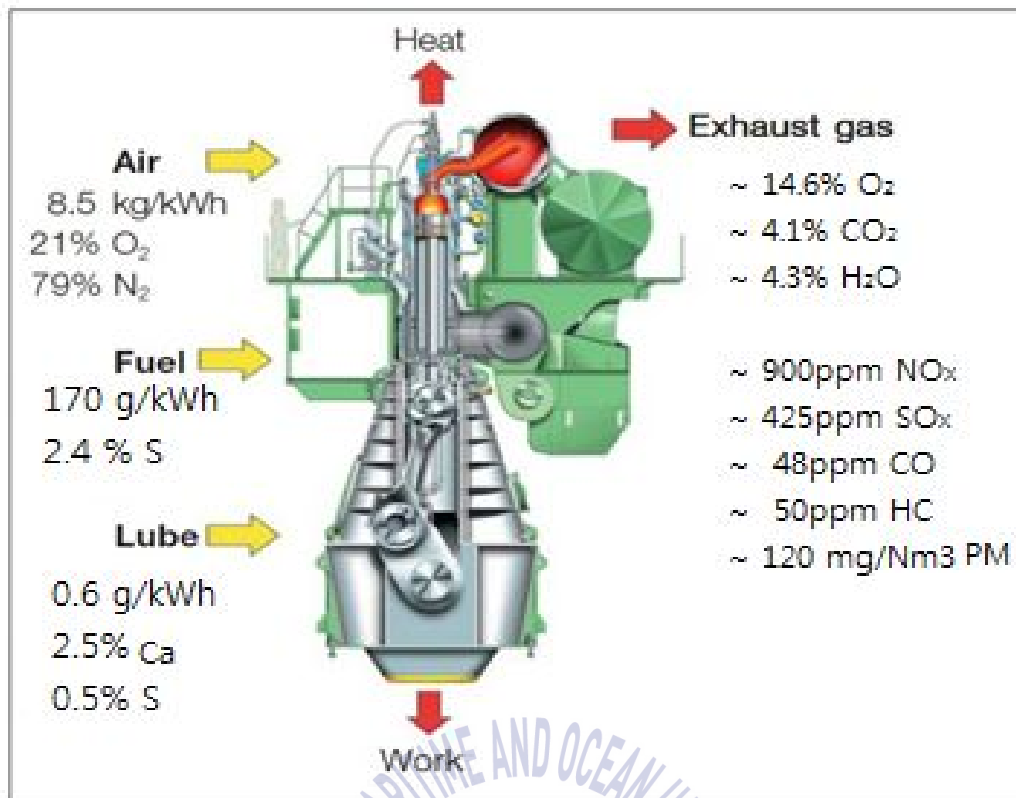


Fig. 2.1 Flow process and typical exhaust gas composition^[3]

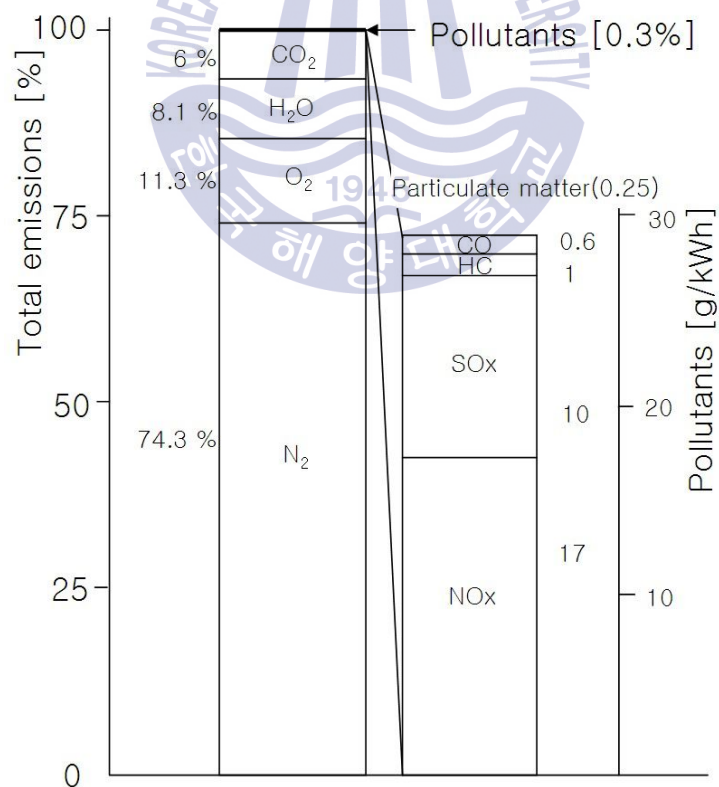


Fig. 2.2 Typical exhaust gas composition(sulfur content 3%)^[3]

2.2 질소산화물 저감 기술

2.2.1 질소산화물에 대한 배출 기준

IMO MARPOL ANNEX VI Regulation 13에 따라 선박에 설치되는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤기관과 2000년 1월1일 이후에 주요 개조가 이루어지는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤 기관으로 한다. 그러나 비상용으로만 사용할 목적의 선박용 디젤기관 또는 선박에 설치되어 비상시에만 사용할 목적의 어떤 장치나 기구에 동력을 공급하는 기관, 또는 비상용으로만 사용할 목적의 구명정에 설치된 선박용 디젤기관은 제외한다.

(1) Tier I

2000년 1월1일 이후 그리고 2011년 1월 1일 전에 건조되는 선박에 설치되는 선박용 디젤기관 운전시 NO_x 배출량은 다음의 제한 값에 따라야 한다.

- 17.0 g/kWh ($n < 130$ rpm)
- $45.0 * n^{(-0.2)}$ g/kWh($130 \text{ rpm} \leq n < 2000 \text{ rpm}$)
- 9.8 g/kWh ($n > 2000 \text{ rpm}$)

(2) Tier II

2011년 1월1일 이후에 건조되는 선박에 설치되는 선박용 디젤기관 운전시 NO_x 배출량은 다음의 제한 값에 따라야 한다.

- 14.4 g/kWh ($n < 130 \text{ rpm}$)
- $44.0 * n^{(-0.23)}$ g/kWh($130 \text{ rpm} \leq n < 2000 \text{ rpm}$)
- 7.7 g/kWh ($n > 2000 \text{ rpm}$)

(3) Tier III

2016년 1월1일 이후에 건조되는 선박에 설치되는 선박용 디젤기관이 미국 NECA(NO_x Emission Control Area)에서 운전시 NO_x 배출량은 다음의 제한 값에 따라야 한다.^[4]

3.4 g/kWh ($n < 130$ rpm)

$9.0 * n^{(-0.2)}$ g/kWh ($130 \text{ rpm} \leq n < 2000 \text{ rpm}$)

2.0 g/kWh ($n > 2000 \text{ rpm}$)

2.2.2 질소산화물 주요 저감 기술

최근 몇 년간 선박용 디젤엔진 제작사들은 많은 지역 국가와 국제기관의 강화된 유해 배기가스 배출 제한에 대하여 능동적으로 대처하기 위해서 세계적인 핵심 기술 개발과 경쟁력 확보에 대하여 부단히 노력하고 있다.

현재 메탄올, 연료전지 및 풍력 같은 대체 에너지를 제외하고 아래와 같은 방법으로 NO_x 배출을 줄일 수 있다. 1차적인(엔진 내) 대책은 유해물 배출의 관점에서 엔진 변수들(밸브 개폐시기, 연료 분사 및 터빈과급)을 최적화함으로써 연소 중에 생성되는 NO_x를 감소시킬 수 있으며, 약 30% ~ 60% 정도 NO_x 배출량을 감소할 수 있다. 2차적인 대책은 배출된 것을 정제기술에 의해 배기가스로부터 NO_x를 제거하도록 설계하여, 약 95% 이상의 NO_x 배출량을 감소할 수 있다고 한다.

NO_x 제거 기술의 선택은 Table 2.1에 요약되어 있으며 1차적인 NO_x 감소대책은 아래와 같이 분류할 수 있다.^[5]

Table 2.1 NO_x reduction treatment for marine diesel engine^[5]

Treatment	Method	Remark
Pre-treatment	Substitute	Methanol LNG Emulsified fuel
Internal treatment	Combustion	Fuel injection timing retard Lean combustion Rich combustion Pre-chamber type combustion Fuel valve nozzle spec modification High pressure of fuel injection
	Scavenging	Scavenging air cooling
	Water injection into cylinder	Water mixture
	Water addition	water mixture into suction air
	Cycle modification	De oxidised furnace Exchange gas recirculation
Post-treatment	Emission de-NO _x	Selective catalytic reduction

- 1) 물 첨가 방법: 실린더 내에 직접 물을 분사하거나 유화된 연료를 사용한다.
- 2) 연료분사 방법: 지연 분사, 연료분사를 조정, 낮은 NO_x를 위한 최적화된 연료를 분무한다.
- 3) 연소(흡입)공기 처리: Miller 과급, 터빈과급 냉각, 흡입공기 가습, 배기가스 재순환
- 4) 엔진 작동과정의 변화: 압축비, 승압 과정

(1) EGR(Exhaust Gas Recirculation) 시스템

배기가스 재순환은 NO_x 배출을 줄이기 위해서 소기를 변환시키는 방법이며 자동차용 장치에서 널리 사용되는 방법이다. NO_x 형성에 있어서 효과는 부분적으로는 연소영역에서의 산소 농도의 감소에 기인하고 배기가스 내의 물과 CO₂ 함량에도 일부 기인한다. 물과 CO₂의 몰(mole) 열용량이 높으면 높을수록 최고 연소온도를 더욱 낮추게 되며 그것이 다른 한편으로는 NO_x 형성을 억제

하게 된다.

EGR는 엔진 출력에 영향을 미치는 일이 없이 NOx 배출(50~60% 정도)을 줄이는 가장 효과적인 방법이지만 황과 회분의 함량이 낮은 연료, 알코올과 가스화 같은 깨끗한 연료를 연소하는 엔진에 있어 좀 더 실용적이 것으로 생각된다. 높은 황을 포함하는 연료로 운전하는 엔진은 터빈 과급기, 중간 냉각기 및 소기 파이프의 부식을 일으킬 수 있다.^[6] Fig. 2.3은 MAN Diesel사의 EGR 시스템을 보여준다.

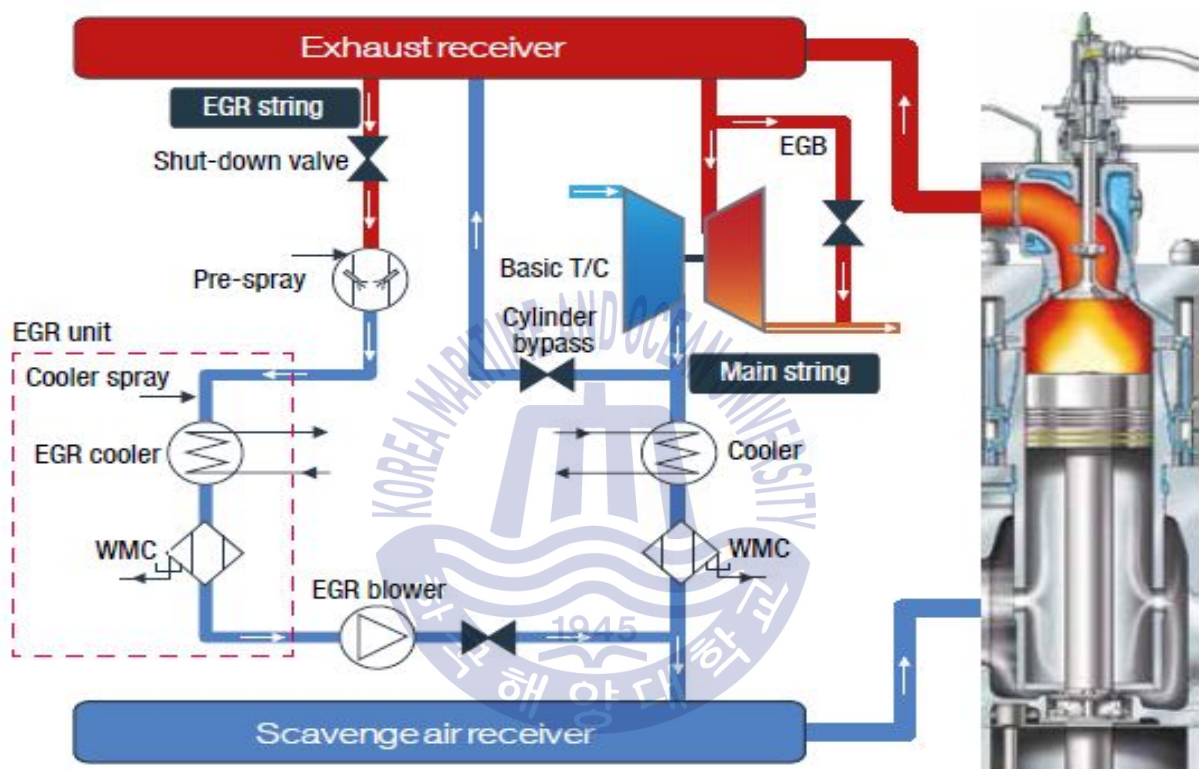
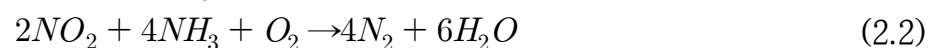
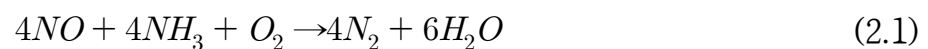


Fig. 2.3 MAN Diesel EGR system^[7]

(2) SCR(Selective Catalytic reduction) 시스템

SCR 시스템의 원리는 NOx가 포함된 배기에 암모니아(NH₃)를 첨가하여 SCR을 통과하면서 촉매 반응을 일으켜 아래 화학 반응식과 같이 환경오염과 무관한 질소와 물로 변환시켜 대기로 방출하게 하는 장치이다.



위의 두 경우의 화학 반응의 끝에 질소(N_2)와 물(H_2O)은 화학 반응이 일어나지 않은 소량의 NO_x 와 배기가 함께 반응기를 통해 대기로 배출되며 암모니아(NH_3) 농도가 10 ppm 이하일 때 NO_x 목표치가 130 ppm 이하이어야 한다. Fig. 2.4는 일반적인 SCR 시스템의 보여준다. 대기 온도에서 저장중인 암모니아(NH_3)는 증발기에서 스팀으로 가열되어 고온의 배기와 접촉시 발화의 위험을 줄이기 위해 NH_3 /Air 혼합기에서 공기와 혼합된다. NH_3 /Air 혼합가스는 암모니아/공기/배기 혼합기에서 배기와 혼합되어 SCR 반응기로 보내진다. 여기서 위의 화학 반응식과 같이 반응기 속에 있는 촉매가 반응을 일으켜 NO_x 가 질소와 물로 반응하여 과급기를 통해서 대기로 방출된다. 촉매의 반응성이 가장 좋은 온도는 $290^{\circ}C$ 에서 $450^{\circ}C$ 이며 온도가 너무 높으면 발화의 위험성이 있고, 너무 낮으면 반응하지 않기 때문에 부식과 암모니아의 오염을 유발한다. NO_x 의 제거량은 NO_x/NH_3 의 비율에 의해 결정되며 NO_x/NH_3 의 비가 높을 때 NO_x 가 제거된다.^[8]

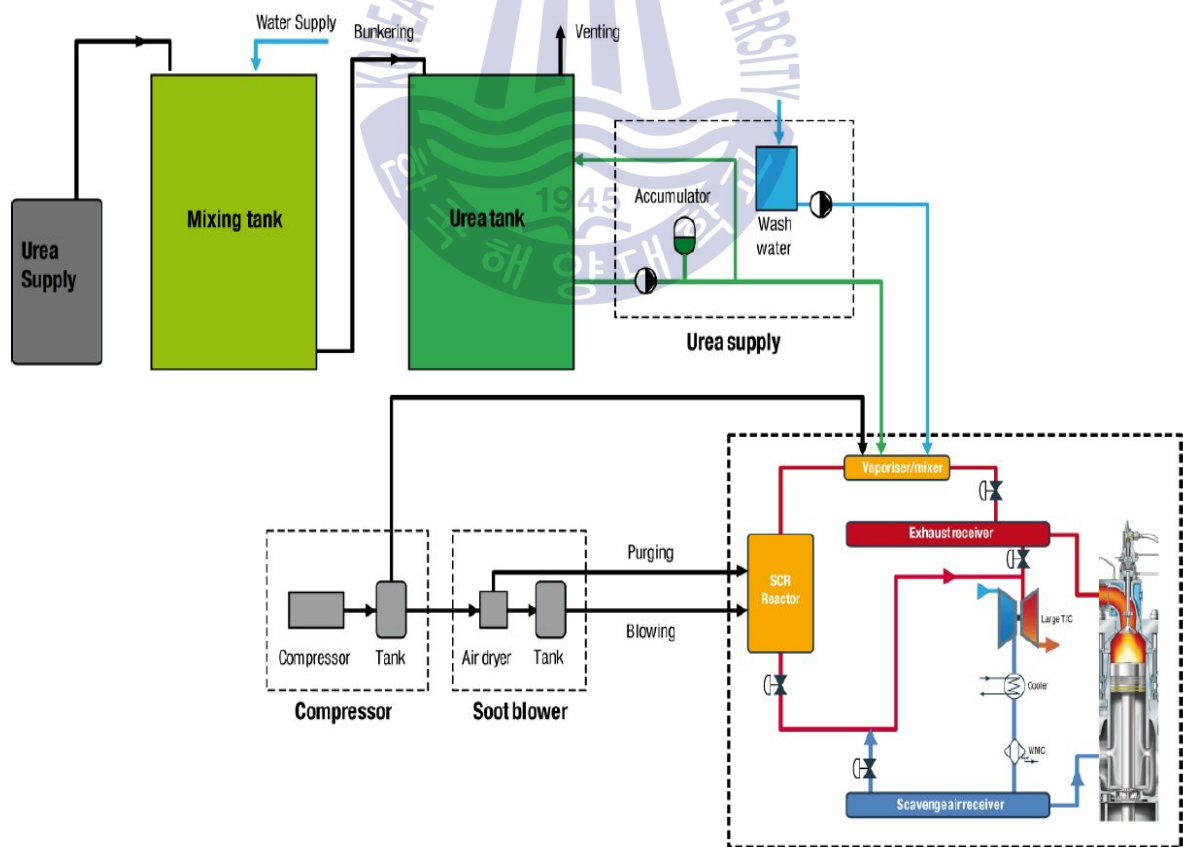


Fig. 2.4 SCR system process^[9]

1) 저압 방식(LP) SCR 시스템

저압 방식 SCR 시스템은 엔진의 터보차저 후단에 위치하며, 엔진룸에 SCR 시스템을 설치 공간이 있는 경우에 가능한 시스템이다. 연료의 황함유량이 0.1% 또는 그 이하로 운전이 되어야 하는 경우에 적용 가능한 시스템이다. Fig. 2.5는 일반적인 LP SCR 시스템을 보여준다. 주요 구성품으로는 SCR 반응기(Reactor), 혼합기(mixer), 분해 장치(decomposition unit, DCU)이며, DCU는 반응기 출구와 혼합기 입구 측에 설치되고, 송풍기(blower), 히터(heater) 그리고 증발기(vaporiser)로 구성되어 있다.

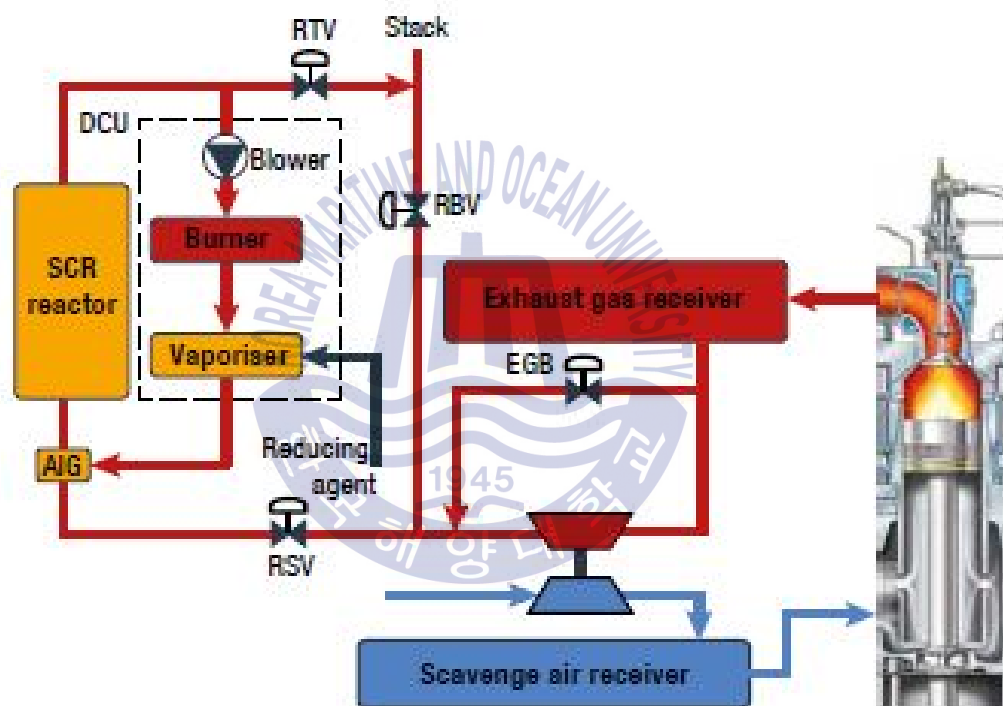


Fig. 2.5 LP SCR system process^[10]

2) 고압 방식(HP) SCR 시스템

고압 방식(HP) SCR 시스템은 엔진의 터보차저 전단에 위치하며, Fig. 2.6은 일반적인 고압 방식(HP) SCR 시스템을 보여준다. SCR 반응기와 결합된 증발기/혼합기로 구성되어 있으며, 작동 방법은 증발기에서 배기가스와 환원제(reducing agent)를 혼합시킨 후, 가스를 SCR 반응기에 보내서 Nox를 감소시킨다. 상대적으로 높은 온도에서 촉매 반응을 해야 하기 때문에 엔진의 터보차저 전단에 설치

하는 것이 시스템의 안정성에서 유리한 측면이 있다. 엔진 부하 측면에서 보면, 배기가스 온도가 저압 방식 SCR 시스템보다 약 50℃~175℃ 정도 높게 된다.

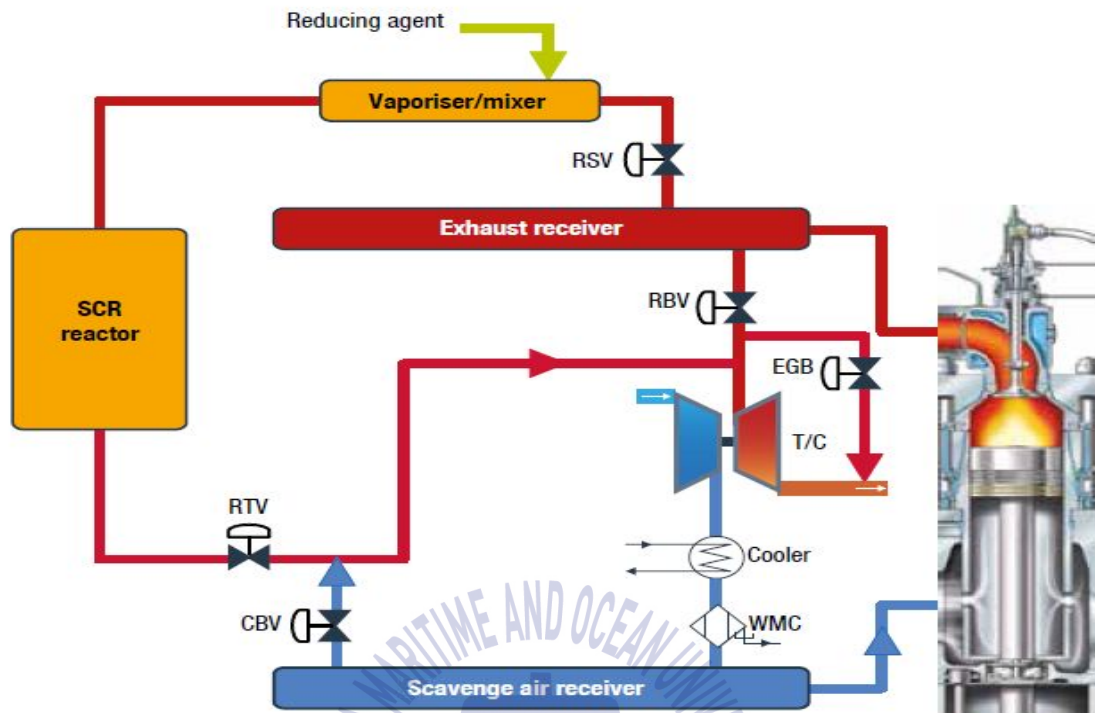


Fig. 2.6 HP SCR system process^[10]

2.3 황산화물 저감 기술

2.3.1 황산화물에 대한 배출기준

IMO MARPOL ANNEX VI Regulation 14에 따라 선박에 사용되는 모든 연료는 황 함유량의 규제를 받으며, SO_x 배출 통제 지역인 발틱 해역, 북해 및 북미 해역 등 지정된 해역에 대해서는 2015년 1월 1일 이후에는 0.1% 이하의 황 함유량 연료를 사용해야 한다. 이외의 지역에서는 3.5% 이하의 황함유량 연료 사용이 가능하다.

2.3.2 황산화물 주요 저감 기술

SO_x는 연료유 중에 포함된 황성분이 연소 과정을 거치면서 SO_x를 형성하는데 주로 SO₂(93%), SO₃(7%)로 생성된다. 디젤엔진의 SO_x 배출은 연료유의 유황 함유량을 낮추거나 배기가스 탈황기술을 사용함으로써 감소할 수 있다. 여러 가지 다루기 어려운 흡수제들[Ca(OH)₂, CaCO₃, NaCO₃]을 사용하는 배기가스 탈황 방법은 선박에서 사용은 어렵다고 판단되며, 선박에서는 스크러버(scrubber)내에서 배기가스를 해수 또는 청수 세척하는 방법이 사용된다. 또 다른 저감 방법에는 가스를 디젤엔진의 연료로 사용할 경우에 가스에는 황산화물 성분의 거의 없기 때문에 국제해사기구에서 요구한 사항을 만족할 수가 있다.^[11]

2.3.3 스크러버(scrubber) 시스템

배기가스 세정장치는 스크러버 기술이 대표적으로 적용되고 있으며, 해수를 직간접적으로 이용하는 습식 스크러버와 건식 스크러버로 나뉜다.

습식스크러버 기술 중에 개방형(open loop system)은 자연적으로 알칼리성을 갖는 해수를 직접적으로 스크러버 상단에 공급시켜서, 바닥으로 떨어지는 해수와 배기가스가 접촉하여 다양한 상호작용을 일으켜 황산화물 및 입자성 물질을 저감시키는 기술이다. 스크러버를 빠져나온 해수는 원심분리 및 pH 레벨의 조

절 과정을 거쳐서 다시 바다로 배출시킨다. Fig. 2.7은 개방형 스크러버 시스템을 보여준다.

폐쇄형 습식 스크러버 기술(closed loop system)은 담수에 수산화나트륨(NaOH) 용액 등을 첨가하여 스크러버로 공급시켜서 황산화물의 중성화 과정을 유도한다. 이 때 스크러버 출구에서 담수의 pH 레벨을 일정하게 유지하도록 수산화나트륨의 분사율을 제어한다. 또한 개방형과 폐쇄형의 장점들을 선택적으로 사용할 수 있는 하이브리드 방식의 습식 스크러버 기술이 있다.^[11] Fig. 2.8은 폐쇄형 스크러버 시스템을 보여준다. 건식 스크러버 기술은 구형 펠렛(pellet)의 수산화칼슘을 배기가스가 통과하는 반응기에 주입시키면, 황산화물과 수산화칼슘이 화학적으로 반응하여 석고가 생성되어 황산화물을 제거하는 기술이다.

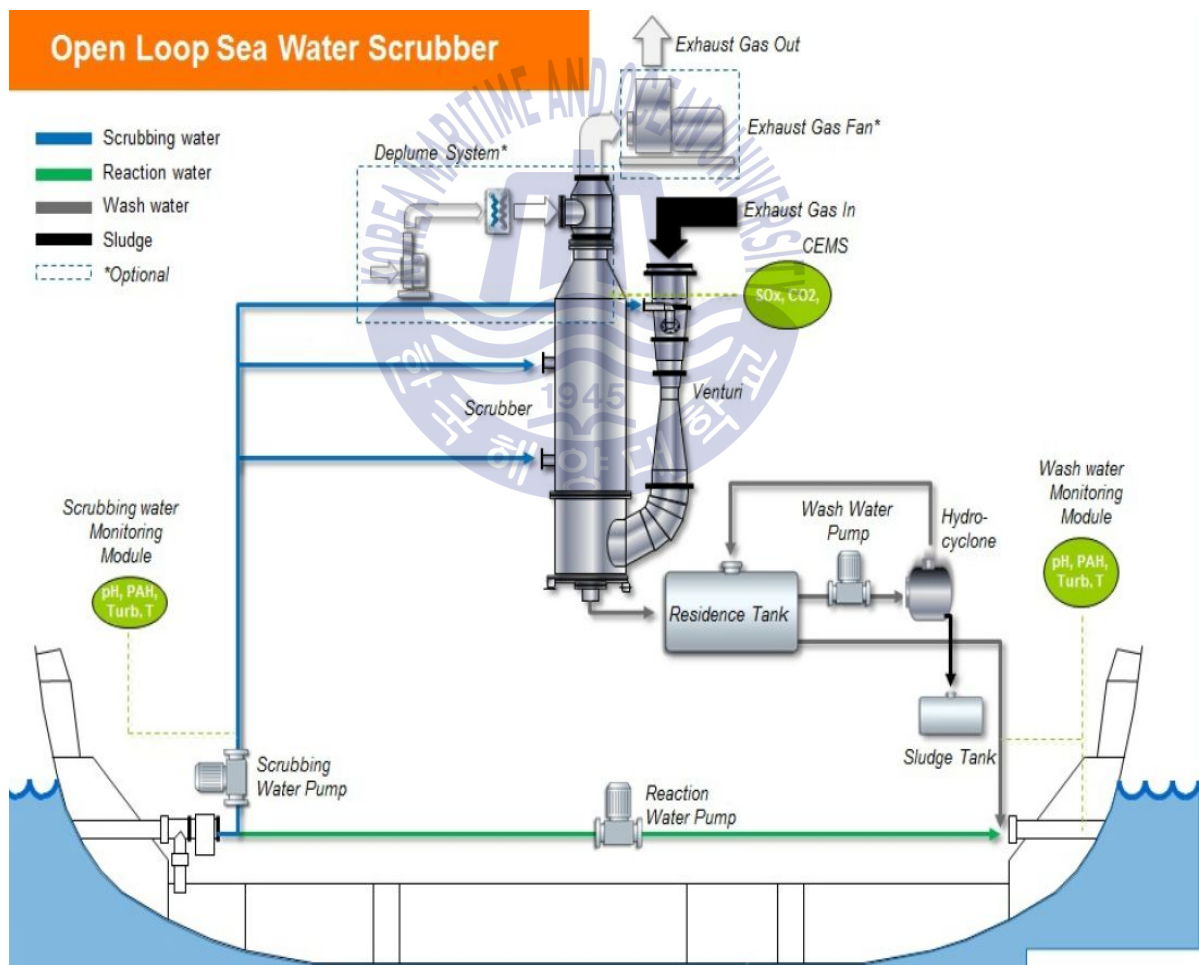


Fig. 2.7 Wartsila open loop scrubber system^[12]

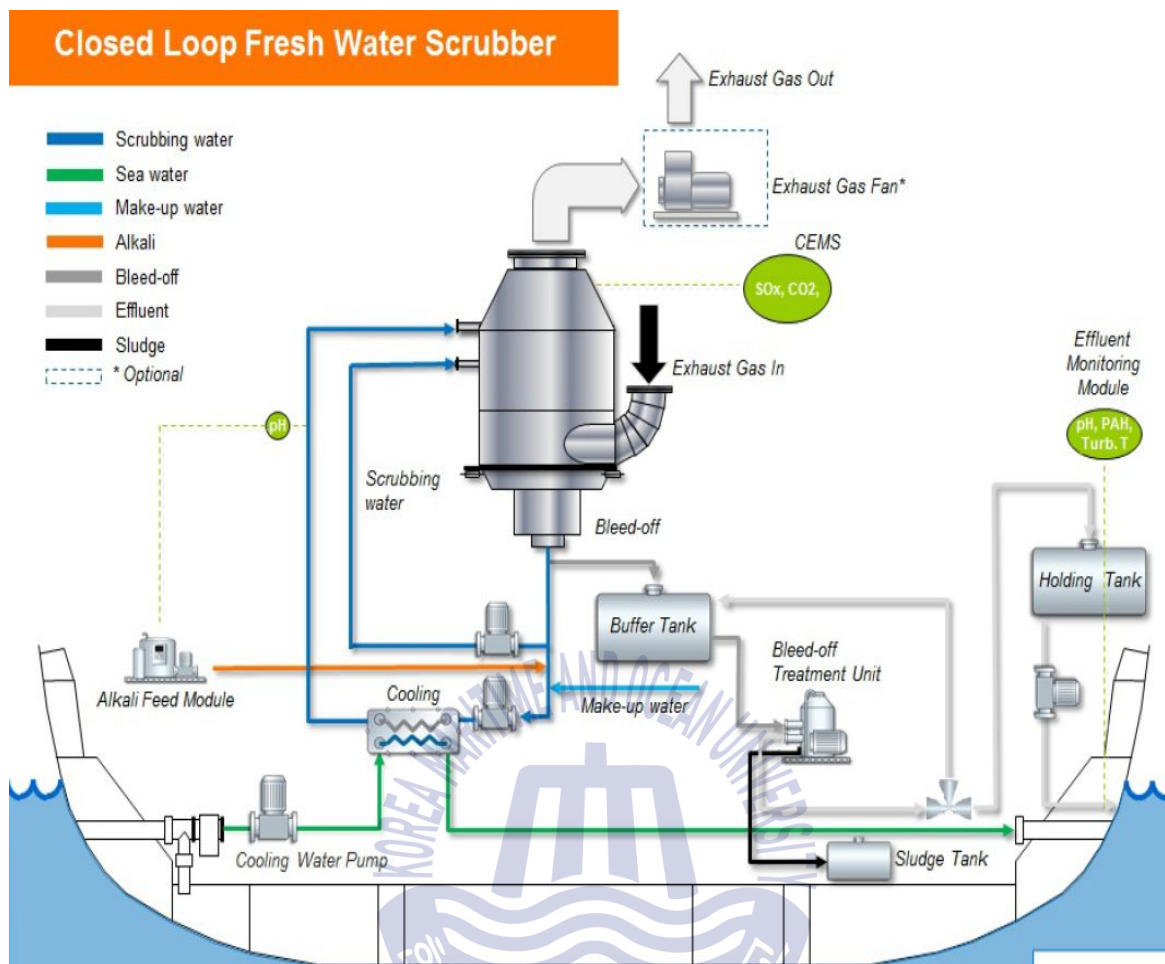


Fig. 2.8 Wartsila close loop scrubber system^[12]

2.4 이산화탄소 저감 기술

2.4.1 이산화탄소 배출 기준

지구온난화의 주범인 이산화탄소 배출 감소를 위해서 국제해사기구(IMO)는 2010년 MEPC 60차 회의에서 협약 초안 관련 문서, 기술 및 운항관련 조치와 시장기반 조치 등의 논의를 하였고, MEPC 63차에서 EEDI, SEEMP가 채택되었다. 기술적 조치인 선박에너지효율설계지수(EEDI)는 2013년 1월 1일 이후에 건조되는 총톤수 400톤 이상의 원양선박에 대해 강제 적용한다. MARPOL ANNEX VI, Regulation 21에 따르면 선박에서 계산에 의해 얻어지는 EEDI가 요구되는 EEDI보다 작게 나와야 선박 운항이 가능한 것을 의미한다. EEDI 식을 살펴보면 다음과 같다.

EEDI는 선박의 연비지수로 선박의 설계 자료로부터 운송능력(톤마일)당 CO₂ 배출량(g)을 지표로 표시한다.

$$EEDI = \frac{CO_2 \text{ 환산계수} \times \text{연료소모량} \times \text{기관출력} \times CO_2 \text{ 저감기술인자}}{\text{화물량} \times \text{선속}} \quad (2.3)$$

EEDI 규제 기준을 살펴보면 선종별로 감축 기준이 약간 다르게 나타나 있고, 3단계로 나뉘어서 이산화탄소를 감축해야 한다. Fig. 2.9(a),(b)는 탱커선에 대한 배출 기준을 나타낸다.

선박에서 EEDI 개발 배경과 목적을 살펴보면, 전반적으로 선복량이 증가하고 선박에 기인한 이산화탄소를 포함한 온실가스(GHG, Green House Gas)의 절대량이 증가하여 글로벌 상한제(global cap)의 필요성이 대두되고, 지구 온난화를 방지하기 위하여 모든 산업분야에서 GHG감축에 노력해야하며 해운분야도 예외가 될 수 없다는 배경이 있다. 목적은 신조 선박에 대한 규정이 강제 또는 추천 사항이 되더라도 이산화탄소를 상당히 줄일 수 있을 것으로 기대되며 범세계적으로 추구하는 GHG감축에 크게 기여하는데 있다.^[13]

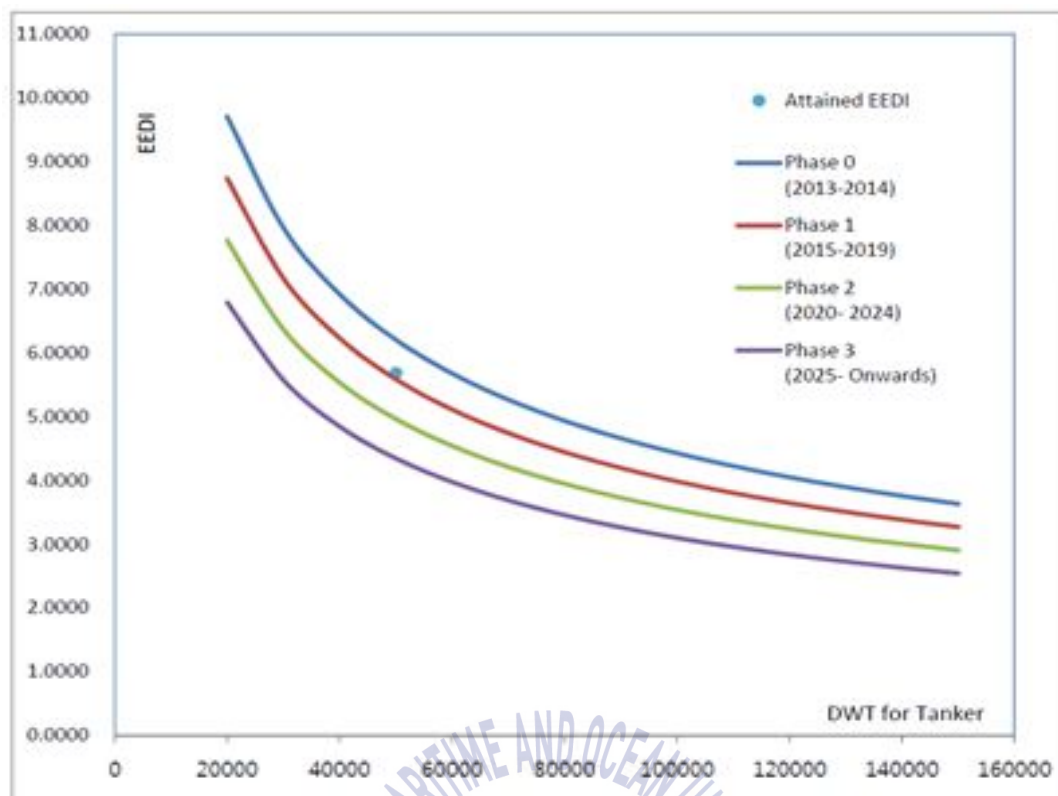


Fig. 2.9(a) EEDI reference line for tanker^[14]

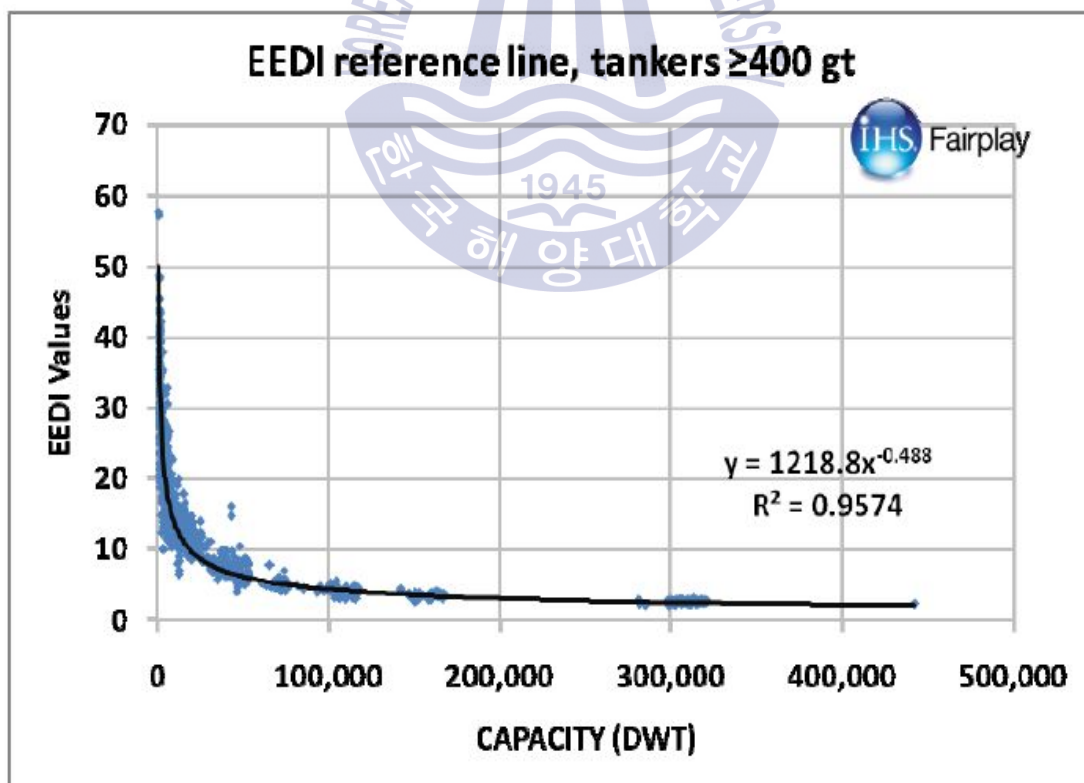


Fig. 2.9(b) EEDI reference line for tanker^[15]

2.4.2 이산화탄소 저감 기술

IMO는 현재 수준과 비교하여 단계적으로 2025년부터 최고 30%까지 감축하도록 EEDI 기준을 강화할 예정이며, 이는 에너지효율 단위로 계산하면, 현재보다 에너지효율이 약 43%가 향상되어야 한다는 것을 의미한다. 또한, 2015년부터는 본격적으로 강화되는 EEDI 기준을 충족시키기 위한 기술을 선박에 적용하여야 하며, 이를 위한 기술개발이 반드시 필요한 상황이다.

IMO의 CO₂ 규제에 따른 전략은 단기적으로 선박의 에너지효율을 향상할 수 있는 기술들을 개발하고, 장기적으로는 현재 선박의 동력원으로 사용되고 있는 디젤엔진을 대체할 수 있는 새로운 개념의 동력원의 출현이 요구되며, 현재까지 개발되어 있는 여러 가지 동력원 중에 연료전지가 가장 강력한 대안으로 판단된다.^[16]

2.4.3 선박에서의 이산화탄소 저감 기술

조선업계에서는 이산화탄소 저감을 위해서 에너지 효율향상과 신 추진동력에 대해서 연구 개발을 진행 중에 있다. 에너지 효율향상 측면에서는 선형에 대한 최적 설계를 통해서 각종 저항을 감소시킴으로써 효율이 향상되고, 고효율 추진기를 개발하여 추진 성능을 향상시키는 방법들이 있다. 신 추진동력 측면에서는 LNG를 추진 선박의 연료를 사용함으로써 이산화탄소를 약 20% 이상 저감할 수 있다. Table 2.2는 분야별 적용 기술을 간단히 정리 요약하였다.^[16]

Table 2.2 Reduction technology of green house gas^[16]

Category	Discipline	Measures
Improvement of energy efficiency	Hull shape	Hull form optimization
		Wave making resistance reduction: bow optimization
		Frictional resistance reduction: antifouling coating, air bubble
		Air resistance reduction: upper construction optimization
	Propulsion performance	High propulsion propeller: contra rotating propeller, controllable pitch propeller, propeller boss cap fin, ducted propeller
	Aux. power	Solar energy, wind power
	Engine	Dual fuel, hybrid
Reduction of GHG	Power plant efficiency	Waste heat recovery system
	Operation efficiency	Operational optimization
New propulsion system	Fossil fuel	CO ₂ capture and storage, exhaust gas after-treatment
	Non-fossil fuel	LNG fuelled propulsion ship
		Fuel cell ship, nuclear propulsion ship

2.4.4 엔진에서의 이산화탄소 저배기 기술

현재로서는 CO₂ 자체를 연소나 후처리기술로 저감할 수 있는 방안은 제시되어 있지 못하며 연료를 적게 사용함으로써 CO₂의 생성량을 줄이는 것이 가장 현실적인 대책으로 알려져 있다.

1) 엔진 종류별(엔진효율의 향상)

이산화탄소 배출 측면에서 디젤엔진이 가솔린엔진의 70%~80% 배출로 유리하여 향후 육상에서는 디젤 자동차 증가가 예상된다. CNG 자동차는 디젤과 함께 CO₂ 배출량이 적어 유리하며 타 배출가스도 가솔린에 비해 적게 배출되는 청정연료로서 인정받고 있으나 주행거리가 출력 면에서의 불리함을 극복해야만 하는 과제가 남아 있다.

선박용 엔진에서는 2행정 저속디젤엔진-4행정 중속디젤엔진-복합가스터빈-가스터빈-스팀터빈 순으로 이산화탄소 배출량이 증가할 것이다.^[17]

Fig. 2.10은 각종 추진 기관의 효율을 나타낸다.

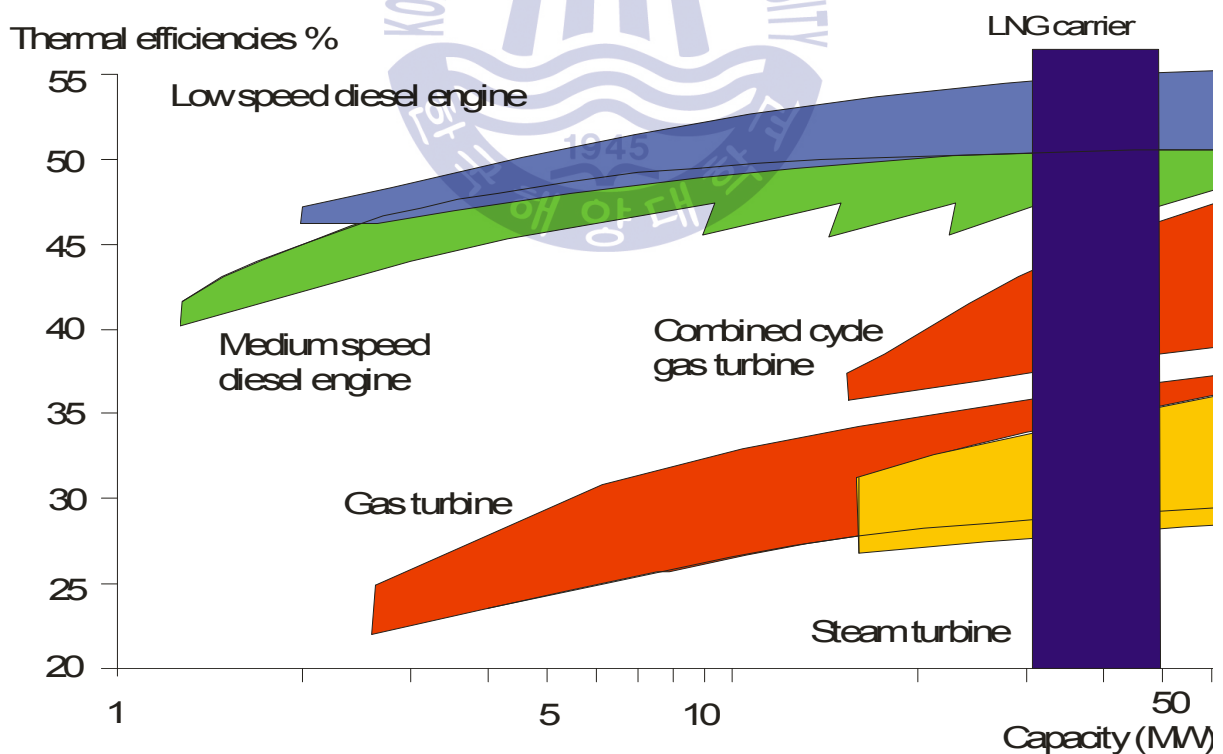


Fig. 2.10 Typical Thermal Efficiencies of Prime Movers^[17]

제 3 장 가스연료 선박 시스템 고찰 및 국제해사기구 주요 설계 요구 사항

3.1 가스연료 추진선박 개발 배경

IMO 협약에 따른 NECA와 SECA 통항제한 기준 및 환경규제에 따라 IMO는 2016년까지 질소산화물(NOx)을 현 수준의 80%를 제한하기로 하고, 황산화물(SOx)에 대해서도 규제 해역을 설정하였으며, 2011년 7월에 개최된 ‘IMO MEPC 62’ [1]에서는 선박의 CO₂ 배출 감소를 위한 규제가 되는 MARPOL VI 개정안이 채택되어 2013년 1월 1일 발효되었다.

IMO의 배출가스 규제는 현재 선박의 동력원으로서 사용되고 있는 MDO(Marin Diesel Oil)와 HFO(Heavy Fuel Oil)를 대체할 차세대 동력원의 개발이 절실히 요구되고 있다. IMO의 배출가스 규제를 만족하고 친환경 측면에서 유리한 천연 가스를 사용할 경우, 고효율에 질소산화물과 황산화물의 배출이 적으며, 이산화탄소의 배출량이 적어서 친환경 에너지이며 국제환경기준에 적합함을 보이고 있다. Fig. 3.1(a),(b)에 따르면 HFO 대신 LNG를 사용할 경우에 NOx는 80%~90% 저감, SOx 배출은 거의 없으며, CO₂는 약 23% 저감이 가능함을 나타내고 있다.

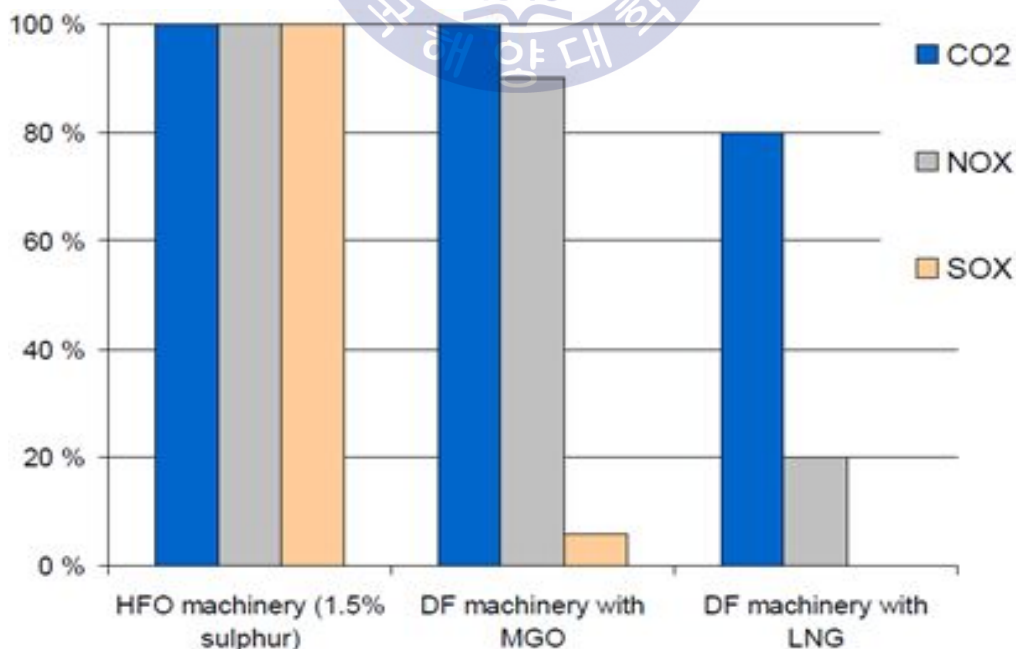


Fig. 3.1(a) Comparison between LNG and HFO/MGO^[18]

Liquefied natural gas (LNG) is the alternative shipping fuel, reducing emissions by up to :

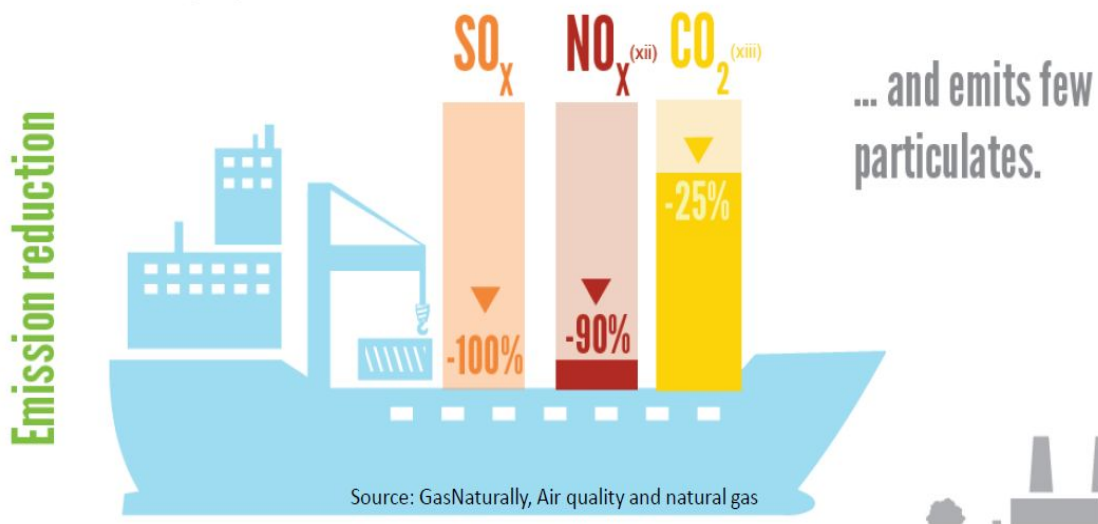


Fig. 3.1(b) Comparison between LNG and FO^[19]

위에서 언급한 규제사항에 맞추어 액화천연가스(LNG)를 연료로 사용하는 소형 선박이 2000년 전후에 유럽의 연안에 등장하게 되었다. 연안에서 운항하는 여객선, 해양지원 공급선등에 적용되었고, 주로 노르웨이에서 LNG를 연료로 하는 선박을 건조하여 운항 중에 있으며, 실제 적용 선박을 살펴보면, Glutra(car and passenger ferry), Viking Eneyr and strill Pioneer, Viking Queen and Viking Lady(offshore supply ships), Viking line cruise ferry등이 있다. Fig. 3.2, Fig. 3.3, Fig. 3.4는 가스연료 추진 선박의 주요 제원 및 도면을 나타내고 있다. Table 3.2는 현재 운항중인 가스 추진 선박 리스트이다. Glutra 선박의 경우는 최초의 가스 연료 추진 여객선으로 가스엔진이 4개의 독립된 기관 구역에 설치되어 있으며, 2000년에 운항을 시작하여 현재까지 문제없이 운전 중에 있다.

Viking Energy and strill Pioneer 선박의 경우는 최초로 일반 상선에 가스 연료 엔진이 설치된 선박이다. 소형 선박으로는, 가스 연료 추진 선박인

에코누리호가 현재 운항 중에 있으며, Fig. 3.5, Fig. 3.6, Table 3.1은 에코누리호의 주요 제원 및 도면을 나타내고 있다.

소형 선박의 경우에는 LNG 사용량이 적고, 운항거리가 짧기 때문에 LNG 연료탱크의 용량이 작고, 저압의 연료가스를 사용하고 있다. 저압의 연료가스 사용은 현재 LNG운반선에 적용되어 실증된 것으로 기존의 규정(IGC등)을 따라 안전을 고려한 설계를 수행할 경우 적용에 큰 어려움이 없다. 이러한 실적 경험을 바탕으로, 대형 상선에 가스연료 추진 시스템을 적용하기 시작하였다.



Fig. 3.2. LNG Ferry Bergensfjord^[20]

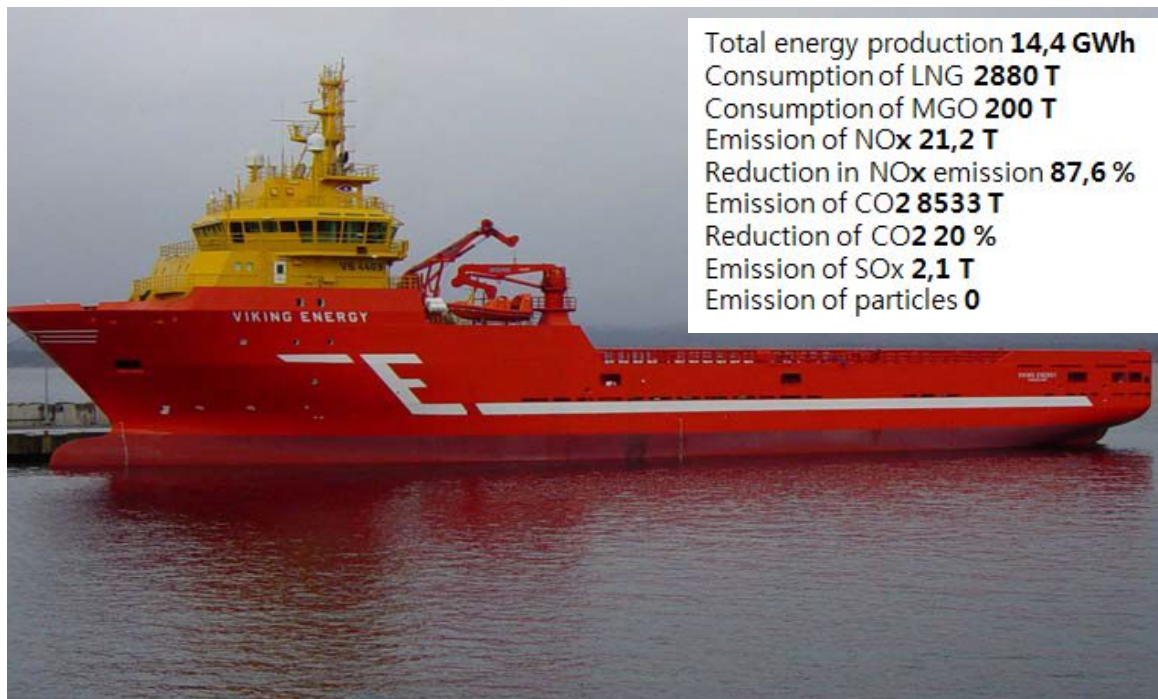


Fig. 3.3 Viking Princess^[21]



Fig. 3.4 Viking line 2800 Pax Cruise Ferry^[22]



Fig. 3.5 Eonuri(Korea)^[23]

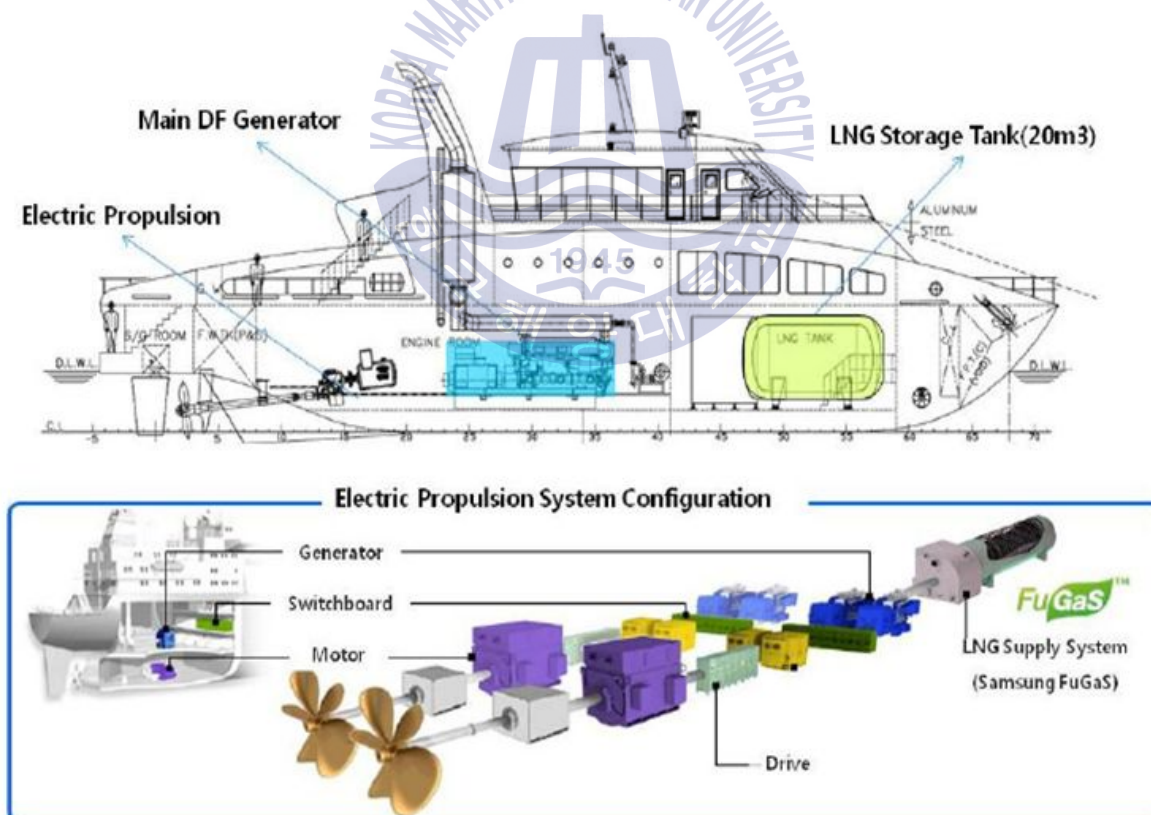


Fig 3.6 Eonuri propulsion system^[24]

Table 3.1 Econuri specification

Vessel specification		LOA: 38 m Breath: 8 m Depth: 4.6 m Draft: 2.2 m Displacement: 382 ton G/T: 200 ton
operational specification		Speed: 15 knots Cruising: Abt. 470 NM(LNG) Abt. 485 NM(DO)
Machinery specification	Machinery	M/E MCR: 1548 kW (Wartsila 9L20DF) D/G(Diesel): 324 kW 1 Bow thruster
	Utility	LNG Tank: 20 m ³ DO Tank: 7.9 m ³
Number of persons	Crew	4 persons
	Passenger	53 persons



Table 3.2 Reference and order lists for LNG fuelled ship^[25]

	Type of vessel	Owner	Class	Year
1	Ferry	Fjord1	DNV	2000
2	PSV	Simon M ø kster	DNV	2003
3	PSV	Eidesvik	DNV	2003
4	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2006
5	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2007
6	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2007
7	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2007
8	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2007
9	PSV	Eidesvik	DNV	2008
10	PSV	Eidesvik	DNV	2009
11	car/passenger ferry	Tide sjo	DNV	2009
12	Car/passenger ferry	Tide sjo	DNV	2009
13	Car/passenger ferry	Tide sjo	DNV	2009
14	Patrol vessel	Remoy management	DNV	2009
15	Patrol vessel	Remoy management	DNV	2010
16	Patrol vessel	Remoy management	DNV	2010
17	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2009
18	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2010
19	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2010
20	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2010
21	Car/passenger ferry	Fosen Namsos Sjø	DNV	2010
22	PSV	DOF	DNV	2011
23	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2011
24	Chemical tanker	Tarbit shipping	GL	2011
25	PSV	Solstad rederi	DNV	2011
26	PSV	Olympic shipping	DNV	2012
27	PSV	Eidesvik	DNV	2012
28	PSV	Eidesvik offshore	DNV	2012
29	Cargo	Sea Cargo AS	DNV	2012
30	Cargo	Sea Cargo AS	DNV	2012
31	Ferry	Buquebus	DNV	2012
32	OSV	Island offshore	DNV	2012
33	OSV	Island offshore	DNV	2012
34	OSV	REM offshore	DNV	2012
35	Car/passenger ferry	Fjord1	DNV	2012
36	General cargo	Nordnorsk shipping	DNV	2012
37	Car/passenger ferry	Torghatten nord	DNV	2012
38	Car/passenger ferry	Torghatten nord	DNV	2012
39	Car/passenger ferry	Torghatten nord	DNV	2012
40	PSV	REM	DNV	2013

41	RoPax	Viking line	DNV	2013
42	Harbor vessel	Incheon port authority	KR	2013
43	General cargo	Eidsvaag	DNV	2013
44	RoPax	Fjordline	DNV	2013
45	High speed RoPax	Buquebus	DNV	2013
46	Ro-Ro	Sea-cargo	DNV	2013
47	Ro-Ro	Sea-cargo	DNV	2013
48	Ropax	Fjordline	DNV	2013
49	Car/passenger ferry	Norled	DNV	2013
50	Car/passenger ferry	Norled	DNV	2013
51	Ro-Ro	Norlines	DNV	2013
52	Ro-Ro	Norlines	DNV	2013
53	Tug	Bukser & Berging	DNV	2013
54	Patrol vessel	Finish border guard	GL	2013
55	Car/passenger ferry	Society of Quebec ferries	LR	2013
56	Tug	CNOOC	CCS	2013
57	Tug	CNOOC	CCS	2013
58	Car/passenger ferry	Society of Quebec ferries	LR	2014
59	Tug	Bukser & Berging	DNV	2014
60	PSV	Harvey Gulf int. marine	ABS	2014
61	PSV	Harvey Gulf int. marine	ABS	2014
62	PSV	Harvey Gulf int. marine	ABS	2014
63	PSV	Harvey Gulf int. marine	ABS	2014
64	Gas carrier	SABIC	BV	2014
65	Gas carrier	SABIC	BV	2014
66	Product tanker	Bergen tankers	LR	2014
67	General cargo	Egil ulvan rederi	DNV	2014
68	General cargo	Egil ulvan rederi	DNV	2014
69	PSV	Remoy shipping	DNV	2014
70	Car/passenger ferry	Aktien Gesellschaft EMS	GL	2014
71	Car/passenger ferry	Samsoe municipality	DNV	2014
72	PSV	Siem offshore	DNV	2015
73	PSV	Siem offshore	DNV	2015
74	PSV	Simon mokster shipping	DNV	2015
75	PSV	Harvey Gulf int. marine	ABS	2015
76	PSV	Harvey Gulf int. marine	ABS	2015
77	LEG carrier	Evergas	BV	2015
78	LEG carrier	Evergas	BV	2015
79	LEG carrier	Evergas	BV	2015
80	Container ship	TOTE ship holdings	ABS	2015
81	Container ship	TOTE ship holdings	ABS	2016
82	Car/passenger ferry	Boreal transport		2016

3.2 가스연료 추진 시스템 구성 요소

3.2.1 가스연료 엔진(gas fuelled engines)

선박에 설치되는 가스연료 엔진은 운전 사이클 방식에 따라 저압가스 분사 방식 엔진과 고압가스 분사방식 엔진으로 구분되어 진다. Table 3.3은 가스 연료 엔진에 대한 종류 및 각종 특성을 비교한 것이다.

Table 3.3 Comparison for gas fuelled engine

Maker	Type	Cycle	Injection pressure, bar	Ignition	Pme bar	Com. type	CH ₄ slip	RPM Comp Ratio
W a r t s l i a	SG	Otto	4-5	Spark plug		Lean burn	2-4%/SFOC	
	DF	Gas: Otto	4-5	Pilot oil: CR (MDO 1%)900bar	19.5-	Lean burn	2-4%/SFOC	514 11.5-12
		Fuel: Diesel	900	99%: Main, (MDO/HFO) 1%: Pilot, CR (MDO)			0	
	GD	Gas: Diesel	300-350	Pilot oil 5%			0.1%/SFOC	
		Fuel: Diesel	900	Compression			0	
	2S	Gas: Diesel	10	Pilot oil 5%		Lean burn	%/SFOC	
		Fuel: Diesel	900	Compression			0	
		RT-flex	1,000	CR	21			Pmax: 160
M D T	4S DF	Gas: Otto		Pilot oil: (1% MDO), CR	19.2-		2-4%/SFOC	
		Fuel: Diesel		99%: Main, (MDO/HFO) 1%: Pilot, CR (MDO)	19-26.9 (28.6/navy)		0	514/720
	ME-GI	Gas: Diesel	300-350	Pilot oil: 5%			0.1%/SFOC	23% CO ₂ ↓
		Fuel: Diesel	800	Compression	19-21		0	
Rols-Ro yce	SG	Otto	4-5	Spark plug	18.2-20		2-4%/SFOC	
	DE	Diesel			22.2-26.7		0	

3.2.2 저압 분사 방식 엔진

일반적으로 Wartsila 50DF 및 X type 엔진이 이에 해당되며, 특징은 가스모드에서는 Otto cycle 방식으로 4 bar ~ 5 bar의 저압가스 분사방식이고, 파이프릿 디젤 연료가 공급된다. 디젤모드에서는 디젤 사이클(Diesel cycle) 방식이 적용되는 엔진이다. 이런 저압가스 분사방식의 엔진은, IMO Tier III에 부가적인 장비 없이 만족할 수 있는 장점이 있고, 반면에 메탄슬립이 일어날 수 있으며, 가스 성분에 굉장히 민감하고, 기존 엔진을 변경하기에는 적합하지 않는 단점이 있다.

Fig. 3.7은 이중 연료 디젤 엔진 작동 방법을 보여주고 있다.

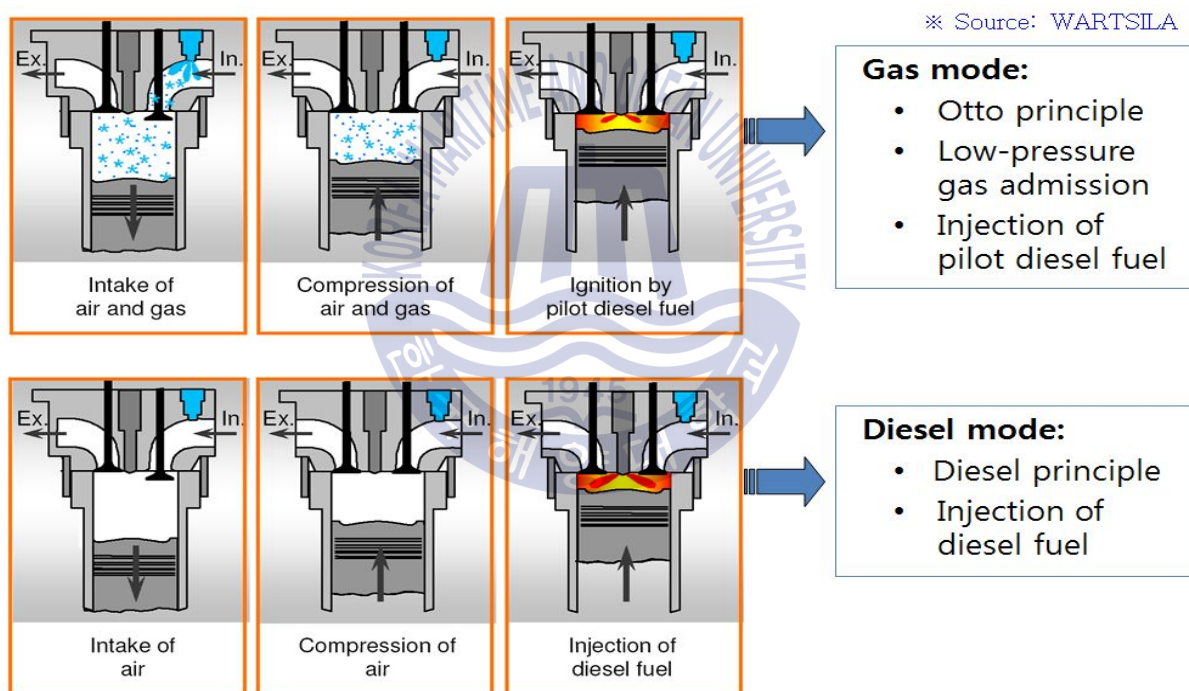


Fig. 3.7 Operating principle for Dual fuel diesel engine^[26]

3.2.3 고압 분사 방식 엔진

일반적으로 MAN Diesel사의 ME-GI 엔진이 이에 해당되며, 디젤 사이클 원리가 적용되며, 300 bar ~ 350 bar의 고압가스 분사 방식이고, 파이프릿 디젤

연료가 공급된다. 고압가스 분사방식의 엔진을 적용할 경우에 IMO Tier III에 만족하기 위해서 NOx 저감 장치가 필요하다.

최소 액체연료유 운전모드인 가스 모드에서는 파일럿 연료를 직접 실린더 내에 분사하여 디젤엔진과 동일한 방법으로 자연착화 시킨 후 파일럿 연료 분사직후에 가스를 높은 압력으로 분사하여 연소한다. 2행정 저속디젤기관의 평균유효압력은 4행정 디젤기관에 비교하여 낮으므로 저압가스분사는 사용하기가 곤란하다. 즉, 기관의 출력이 현저하게 떨어져 비경제적이다. 따라서 고압분사방식을 채택하여 기존의 액체 연료유 분사기관과 거의 동일한 출력과 열효율을 유지할 수 있고, 파일럿 연료를 먼저 분사하기 때문에 압축행정을 피하므로 기관의 성능을 저해하는 노킹(knocking)을 방지할 수 있다. 액체 연료유로 100% 연소가 가능하고 액체 연료유가 최소 5%이상부터는 어떠한 가스와 액체의 혼합비율에서도 연소가 가능하다.

액체연료와 가스의 혼합기는 압축과정 중 연소실에서 분사되기 때문에 높은 분사압력이 요구되어지고 4행정 가스디젤엔진은 350 bar, 2행정 가스디젤엔진은 250 bar 정도의 가스압력이 요구된다.

3.2.4 가스 연료 시스템 개요

저압 및 고압가스 분사 방식, 가스탱크 종류에 따라 가스 연료 시스템의 운전 방식이 다를 수 있으며, 여기에서는 고압가스 분사 방식 및 타입 B 탱크 적용할 경우 시스템 개요는 다음과 같다.

ME-GI 엔진은 고압가스 분사 방식이며, 엔진 입구에서 300 bar, 45℃의 가스 압력 및 온도가 필요하다. LNG는 대기압 하에서 -163℃ 임에 따라 LNG를 엔진에서 요구하는 압력 및 온도로 변경해서 공급시켜야 한다. 300 bar까지 압력을 증가시켜주기 위한 고압펌프가 설치되고, 증가된 고압가스를 엔진에서 요구하는 온도(45℃)까지 증가시킬 수 있는 장치, 즉 고압 증발기(HP Vaporizer)가 필요하며, 초저온의 가스와 열 교환을 하기 때문에 결빙을 방지하기 위해서 글리코 시스템을 적용하고 있다. Fig. 3.8은 가스 연료 시스템의 개략도면을 나타낸다.

3.2.5 가스 연료 시스템 구성 요소

가스연료 공급 장치의 구성 요소 및 기능을 살펴보면 다음과 같다.

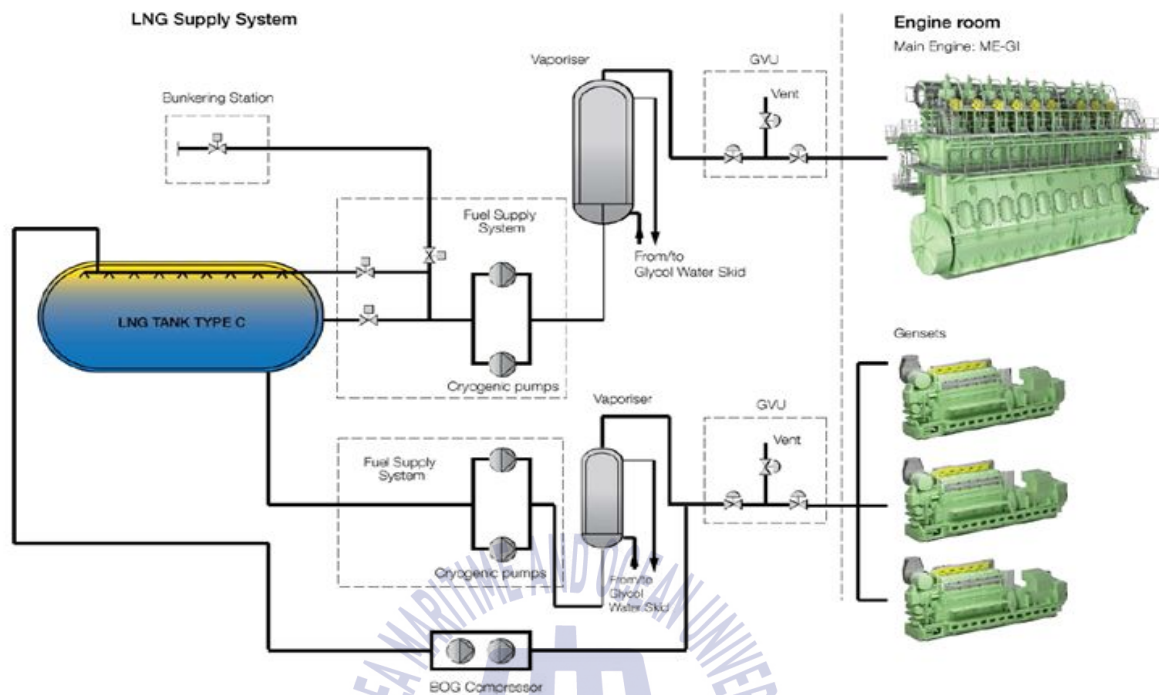


Fig. 3.8 Principle diagram for LNG fuel supply system^[27]

(1) 압력생성장치(Pressure build up unit)

가스탱크 내부의 압력을 시스템에서 요구하는 압력을 일정하게 유지되게 하는 장치이다. 작동 방법은 가스탱크에 있는 일부의 액화천연가스를 열교환기에서 증발시켜 증발된 가스를 다시 가스탱크로 보내면 가스탱크의 압력이 증가되어 시스템에서 요구되는 압력을 유지하게 된다.

(2) 액화천연가스 증발기(LNG Vaporizer)

저압 분사 엔진 및 보일러의 연료로 사용되는 액화천연가스를 엔진 및 보일러에서 요구하는 온도로 올려주는 장치이다.

(3) 액화천연가스 고압 증발기(LNG HP Vaporizer)

250 bar 이상의 고압분사 엔진의 연료로 사용되는 액화천연가스를 엔진에서 요구하는 온도로 올려주는 장치이다.

(4) 고압펌프(High pressure pump)

고압분사엔진의 경우, 엔진에서 요구하는 압력이 약 300 bar임에 따라 HP pump는 LNG를 약 300 bar까지 압력을 상승시켜주는 펌프이다. 고압 펌프의 사양은 사용되는 가스 밀도, 엔진에서 요구하는 용량 등을 고려하여 선정한다.

Fig. 3.9는 일반적인 고압펌프를 나타낸다.



Fig. 3.9 High Pressure pump^[28]

(5) 가스 히터(Gas heater)

가스탱크에서 공급되는 저온의 천연가스의 온도를 발전기엔진 또는 보일러에서 요구하는 온도까지 상승시켜주는 장비이다. Fig. 3.10은 일반적인 가스히터를 나타낸다.

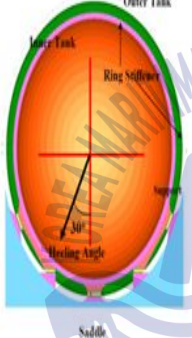
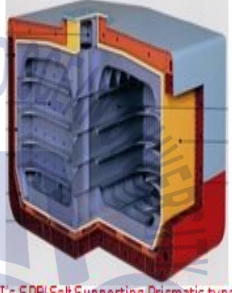
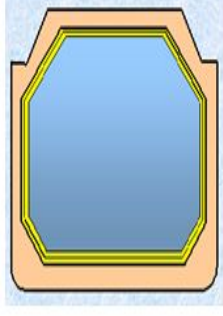


Fig. 3.10 gas heater

(6) 가스 탱크

운항 중에 가스 엔진 또는 가스보일러를 작동하기 위한 가스를 저장하는 탱크이며, IMO에서는 가스탱크에 대한 관련 요구사항이 있다. 가스탱크는 IMO 멤브레인 탱크(Membrane tank), 타입 A, B & C 독립 탱크, 네 가지 종류가 있으며 각각의 타입에 대한 특징 및 사양을 아래 Table 3.4에 나타나 있다. 일반적으로 일반 상선에 타입 B & C 독립 탱크가 주로 설치되는데 선박의 탱크 공간 및 시스템 설계에 따라 결정되고 있다.

Table 3.4 Comparison table for IMO type tank^[29]

Items	IMO Tank Type C (Independent)	IMO Tank Type B (Independent)	Membrane Type
Tank Shape			
2 nd Barrier	No needed	Partially 2 nd Barrier (It is able to contain the expected leakage amount for 15days through analysis)	2 nd Barrier is must
Cargo Space	Inefficient	Better than IMO Type C	Most efficient
Insulation	Tank Outside	Tank Outside	Tank Inside
Tank Pressure	5 barG	0.7 barG	0.7 barG
BOG(Boil Off Gas) Handling Devices	- No provision - Venting	- LD Compressor - GCU, Boiler etc	- LD Compressor - GCU, Boiler etc

3.3 가스 연료 공급 시스템의 문제점 및 과제

(1) 가스연료엔진

파일럿 연료의 혼합비율은 압축착화라고 하는 디젤엔진의 연소특성에 기인하는 것이다. 일반적인 선박 연료유인 HFO의 자연발화온도는 약 250℃이며, LNG(Methane)의 자연발화온도는 537℃이다. 따라서 LNG만을 연료로 사용할 경우에는 디젤엔진을 운전할 수 없으므로 디젤엔진의 연소실에 LNG를 연료로 공급할 때, 디젤엔진에서 착화가 발생할 수 있도록 파일럿(pilot) 연료로서, MDO를 일부 혼합하여 공급하게 된다. 파일럿 연료로서 공급되는 MDO의 비중이 적을수록 CO₂를 비롯한 각종 대기오염 물질의 배출량을 줄일 수 있게 된다. 현재 사용되고 있는 가스 연료 엔진의 경우, 파일럿 연료의 공급비율이 5% 수준인 것으로 알려져 있으며, 연소기술의 개발을 통해 파일럿 연료의 공급 비율을 어디까지 줄여나갈 수 있는지가 가장 중요한 기술적 사항이라 할 수 있다.^[30]

(2) 연료 탱크 배치

대형 컨테이너선에 가스연료 추진 시스템이 적용될 경우에 컨테이너선의 가시도(visibility) 요건에 의해 거주구역이 선박의 선수부로 이동하여 배치되게 되며, 가스엔진에 연료용 가스를 공급하기 위한 연료가스 탱크를 거주구역 하부에 배치하는 것이 선박의 구조상 효율적인 배치 방법이다. 이럴 경우, 거주 구역 하부에 위치한 연료가스 탱크에서 폭발 사고가 발생할 경우 선박의 구조적 안전성 및 폭발 방지 안전 시스템을 확보할 수 있어야 할 것이다.

LNG 탱크의 연료 용적은 중유의 약 2배로 된다. 채용가능성이 있는 연료탱크는 IGC code가 적용되는 독립형의 Type B와 Type C의 두 종류가 있지만 대용량의 연료저장이 요구되는 대형선에서는 어느 정도 화물 공간을 희생하여 탱크 설치 공간을 확보할 수밖에 없기 때문에 그 만큼 화물 적재량이 줄어들게 된다. Fig. 3.11은 실제 대형컨테이너선에 Type B형이 설치될 경우의 배치 도면이다.

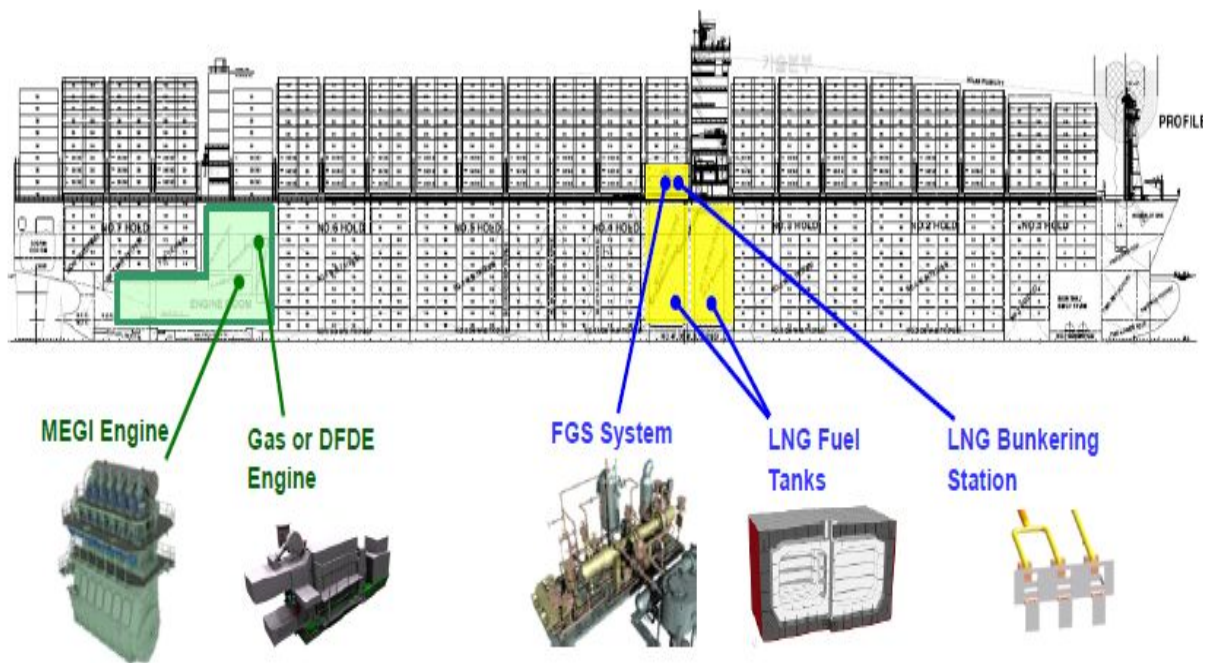


Fig. 3.11 14,000 TEU container ship^[31]

(3) 폭발 방지

연료유 탱크의 압축 압력을 높이면 동일한 체적에 더 많은 연료가스를 저장할 수 있어, 연료유 탱크가 차지하는 체적을 줄일 수 있지만, 이럴 경우 폭발 사고가 발생한 경우에 폭발력이 증가하게 되어, 선박의 구조적 안전성을 위협하게 된다. 반면에 연료유 탱크의 압축 압력을 낮추게 되면 동일한 체적이 보관할 수 있는 연료 가스의 양이 상대적으로 줄어들게 되어 연료 가스 탱크 배치에 필요한 체적이 늘어나게 되어, 선박의 경제성이 떨어지게 된다. 따라서 연료 가스 탱크의 배치에 필요한 체적이 최적의 조합을 이룰 수 있도록 설계를 수행해야 하며, 이때 연료 가스 탱크의 폭발력에 의한 선박의 구조 건전성에 대한 검토가 필요하다. IGF 코드(code)에서는 화재, 폭발 방지에 규정을 제정하여 선박의 안전성을 유지하도록 하고 있다. 다음 장에서 자세히 서술할 예정이다.^[32]

3.4. 국제해사기구 주요 설계 요구 사항^[33]

3.4.1 개요

질소산화물, 황산화물 및 이산화탄소 배출 기준이 강화되고 이 규제에 만족하는 선박을 건조하기 위해서 선주, 기자재 업체 및 조선소에서는 여러 가지 대처 방안을 연구 개발되고 있다. 가스를 추진 기관의 연료로 사용하는 선박의 개발이 이루어지고 적용하고 있는 실정이며, 이에 따라 국제 해사 기구에서는 2009년 이후, 가스 연료 선박에 대한 시스템 설계, 화재 안전, 전기 시스템, 제어 감시 및 안전 시스템, 압축기 및 가스 엔진, 제조 및 시험 등에 관해서 지침(IGF code)을 작성 하였으며, IMO MSC.391(95)에 의해 채택되어, 2017년 1월 01일 이후 건조되는 가스 추진 선박에 적용 예정이다.

IGF 코드에 언급된 내용 중 가스 연료 시스템 설계, 안전 설계 및 가스탱크 설치에 관한 안전에 설계 기준에 관한 주요 내용을 살펴보면 다음과 같다.

3.4.2 기관실 안전 개념 및 설계 기준

국제해사기구(IMO)에서는 기관실에서 가스 폭발 위험에 대한 안전에 대해서 두 개의 개념을 도입하였다. 가스 안전 기관구역과 비상정지 기능으로 보호되는 기관구역으로 정의되었다.

가스 안전 기관구역에 대한 개념은 기관구역에서의 배치는 정상상태뿐만 아니라 비정상상태의 모든 조건하에서의 가스 안전을 고려하여야 하고, 이러한 조건에서는 기관구역 경계면 내의 모든 가스 공급관(이중관이나 이중덕트)은 가스밀로 폐워되어야 한다. 가스공급관내에 누설로 가스 공급을 차단할 필요가 있는 경우, 이를 대체할 수 있는 예비 독립 연료공급 장치가 있어야 한다. 그렇지 않으면, 여러 대의 엔진이 설치된 경우, 각각의 엔진 또는 엔진그룹에 독립적이고 분리된 가스 공급 시스템을 인정할 수 있다. 단일 연료(가스만 사용)를 사용하는 엔진에 대해서 연료 저장은 대략 동일한 크기의 두개 이상의 탱크를 배치하여야 한다. 탱크들은 분리된 구획에 위치하여야 한다. Fig. 3.12는 가스

안전 기관구역에 대한 기본 개념을 보여주고 있다.

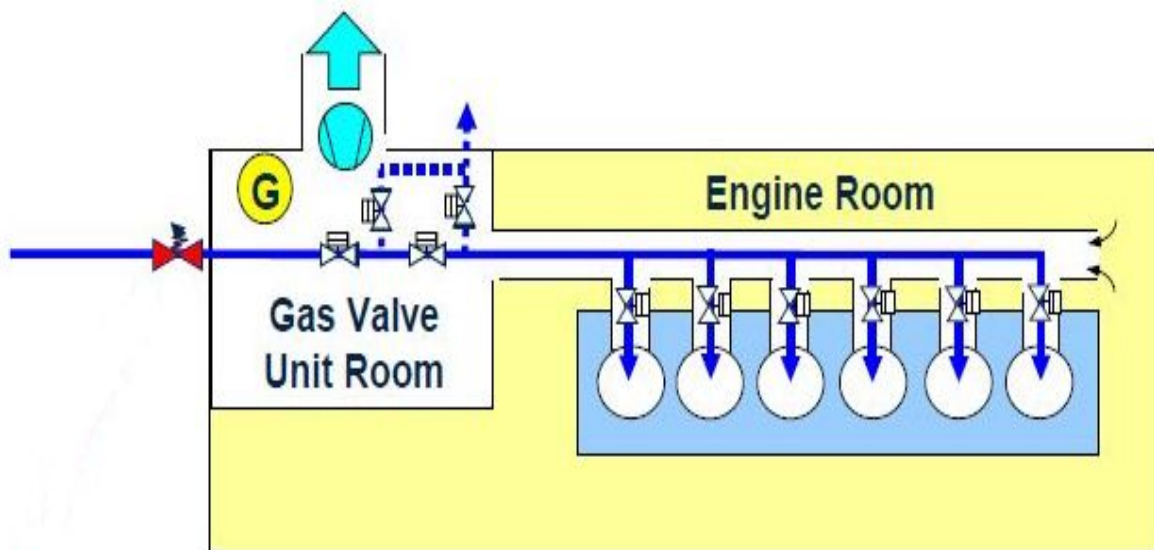


Fig. 3.12 Concept for gas safe machinery space^[34]

비상정지 기능으로 보호되는 기관구역에 대한 개념은 기관구역에서 배치는 정상상태 하에서 위험이 없다고 고려한 것이어야 한다. 하지만 어떠한 비정상상태에서 위험하게 될 가능성을 가지고 있다. 가스위험을 포함한 비정상 상태가 발생한 경우, 안전하지 않은 장치(발화원)와 기기의 비상정지가 자동적으로 이루어져야 하고, 이러한 조건에서 사용되거나 작동중인 장치와 기기는 어떠한 안전한 형식의 것이어야 한다. Fig. 3.13은 비상정지 기능으로 보호되는 기관구역에 대한 기본 개념을 보여주고 있다.

기관구역내의 가스공급배관은 다음의 조건을 만족한다면 외부가스폐위 없이 허용할 수 있다.

- 1) 추진동력과 전기 동력을 생산하는 엔진은 공동 경계면이 어떤 하나의 기관 구역에서의 폭발을 견딜 수 있다는 것을 문서화 할 수 없는 한, 어떠한 공동 경계면을 가지지 않는 두 개 이상의 기관구역에 설치되어야 한다. 각각의 기관구역간의 엔진의 배치는 어떠한 하나의 기관구역에 연료 공급의 차단이 발생할 경우 적어도 항해시 40%의 추진력과 정상적인 전력공급이 가능하도록 배치하여야 한다. 소각기, 불활성가스 생성장치 또는 기타 보일러는 비상 정지 기능으로 보호되는 기관구역에 설치될 수 없다.

- 2) 가스 기기, 탱크 및 밸브를 설치하는 장소는 각각의 구역에서 장치들의 모든 부속품의 주요 기능을 유지하는 것의 확인을 요구하듯이 최소한으로 필요한 장치, 구성품과 시스템을 포함하여야 한다.
- 3) 기관구역의 가스공급관의 압력은 10 barg 이내이어야 한다. 이 개념은 저압 시스템에 대해서만 사용된다.
- 4) 가스공급을 자동적으로 차단하고 폭발에 보호되지 않는 모든 기기 또는 설비를 분리시키기 위한 가스검지시스템이 설치되어야 한다.
하나의 가스설비 (가스만 사용)에 대하여, 가스연료는 거의 동일한 크기의 두 개 이상의 탱크에 나누어져 보관되어야 한다. 이러한 탱크들은 별도의 구역에 위치하여야 한다.

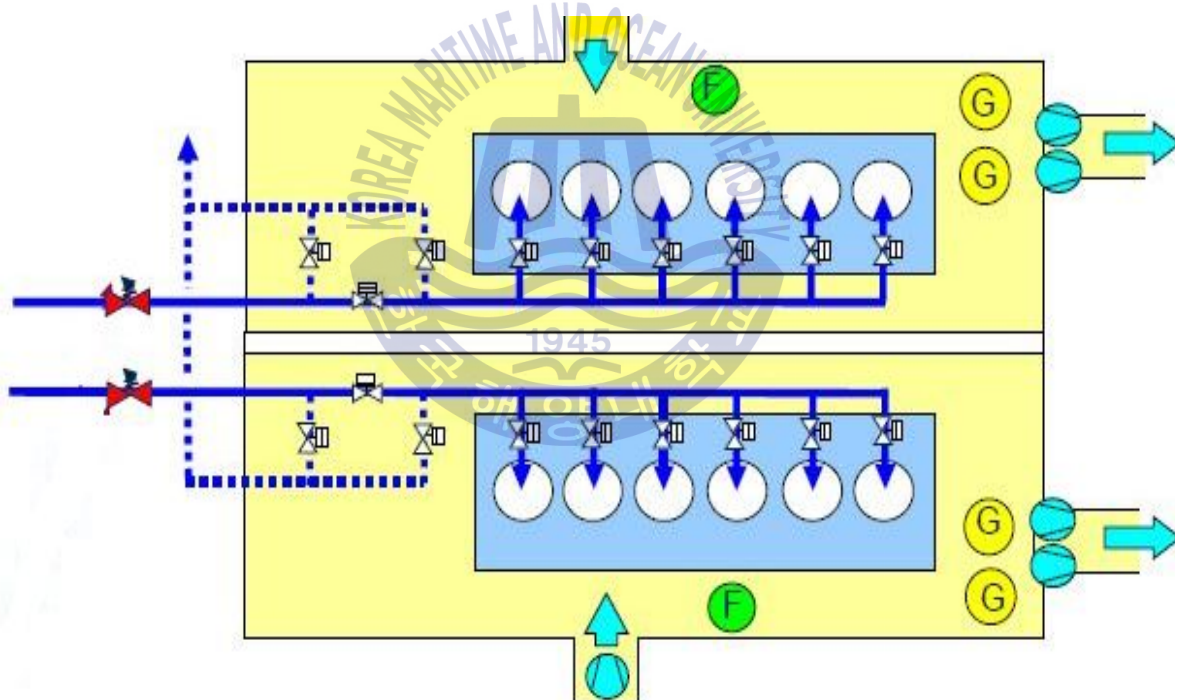


Fig. 3.13 Concept for ESD protected machinery space^[35]

3.4.3 가스 기관구역내의 가스공급시스템

(1) 가스안전 기관구역에 대한 요구 사항

가스안전 기관구역에서 가스 공급관들은 이중관 또는 덕트에 의해 완벽하게 폐위되어야 하고, 이러한 이중관 또는 덕트는 다음 중 하나를 만족하여야 한다.

- 1) 가스 배관은 내부 관에 가스연료가 있는 이중관 시스템이어야 한다. 이중관의 바깥관과 내부관사이의 공간은 가스연료 압력보다 큰 압력의 불활성 가스로 가압되어야 한다. 이중관 내부의 불활성 가스의 유출을 알릴 수 있는 적절한 정보장치가 설치되어야 한다.
- 2) 내부관이 높은 압력을 가지고 있을 때, 이러한 시스템은 마스터 가스밸브가 닫히면 엔진과 마스터 가스밸브 사이의 파이프가 자동적으로 폐지할 수 있어야 한다.
- 3) 가스연료 배관은 환기되는 배관 또는 덕트내에 설치하여야 한다. 가스 배관과 외부 배관 또는 덕트 사이의 공간은 시간당 최소 30회의 환기능력을 가지는 기계식 압력 통풍장치를 설치하여야 한다. 이러한 환기능력은 가스검지를 할 수 있고 질소가스를 덕트에 자동적으로 충전할 수 있도록 되어 있다면 시간당 10회의 환기로 감소될 수 있다. 팬 모터는 설치구역에 요구되는 폭발방지 규정에 적합하여야 한다. 환기 배출구는 가스/공기 혼합물이 발화 할 수 없는 곳에 설치하여야 하고 보호망이 설치되어야 한다. 가스배관의 연결부와 가스 분사 밸브의 덕트부는 덕트로 완전히 보호할 수 있어야 한다. 이중 덕트는 또한 엔진내의 가스관과 가스가 챔버내에 분사되기까지의 모든 가스배관에 설치하여야 한다.

고압배관에 대한 덕트의 설계압력은 최고 충만 압력과 파열측면에서 국부 순간 최고 압력 중 높은 값을 적용해야 한다.

- 최고 충만 압력 : 원형의 공간에서의 가스의 흐름에 의한 파열측면에서의 정압
- 파열측면에서 국부 순간 최고 압력 : 임계압력으로 얻어지고 다음의 수식으로 얻을 수 있다.

$$p = p_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (3.1)$$

P0 : 내부 배관의 최고 작동 압력

K = Cp/Cv 정압비열을 정적비열로 나눈 것.

K = 메탄에 대한 1.31

직선관의 접선 막 응력(Tangential Membrane Stress)는 상기압력의 영향을 받을 때 인장강도를 1.5 (Rm/1.5)로 나눈 값을 초과해서는 안 된다.

상기 식으로 얻어지는 최고 압력을 사용하는 대신에 대표 시험으로 찾아낸 최고 압력을 사용할 수 있다.

저압 배관에 대한 덕트는 가스관의 최대 작동 압력 이하의 설계압력으로 설계되어서는 안 된다. 또한, 덕트는 가스관의 파열시 예상되는 최고 압력을 감당할 수 있음을 확인할 수 있는 압력시험을 실시하여야 한다.

고압 가스관의 배치 및 설치에 피로로 인한 문제 발생 위험 없이, 주기관의 주기적인 움직임을 감당 할 수 있는 필요한 유연성을 갖도록 설치하여야 한다. 비상정지 기능으로 보호되는 기관구역의 경우에는 가스공급시스템 내의 압력은 10bar를 초과할 수 없고, 가스공급관의 설계압력은 10 bar 이상이어야 한다.

Fig. 3.14는 기관실 가스 공급 시스템에 대한 국제해사기구 요구 사항을 만족하는 개략적인 도면을 보여준다.

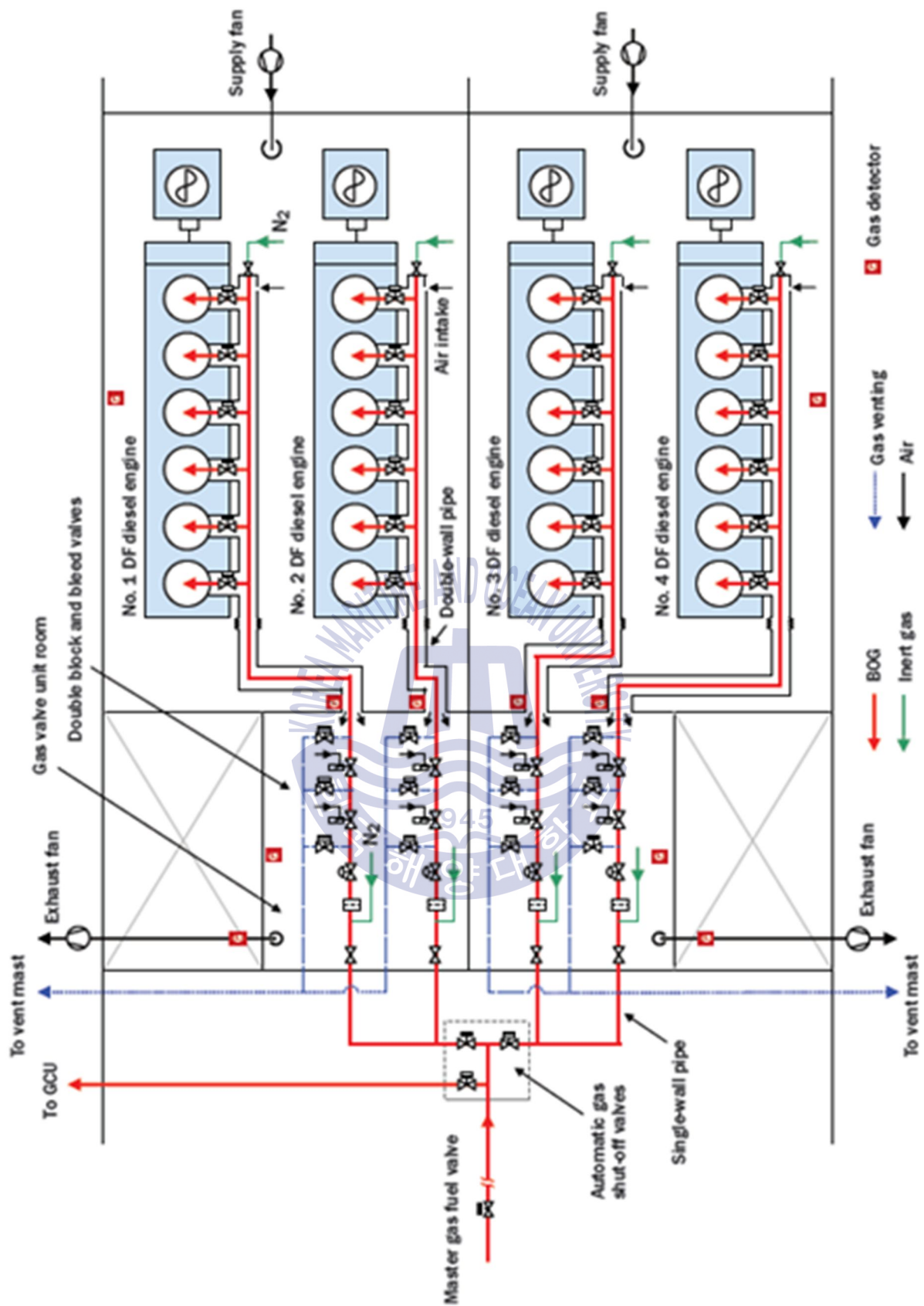


Fig. 3.14 Typical gas fuel supply system^[35]

3.4.4. 연료 저장 시스템(Fuel containment system)

가스 연료 추진 선박의 경우에 안전하게 가스를 저장하는 것은 매우 중요한 사항 중에 하나이다. 국제 해사 기구에서는 인체, 선박 및 환경을 고려한 안전을 규제하고 있으며 다음 사항에 대해서 만족하여야 한다.

(1) 기능 및 일반적인 요구사항

연료 저장 시스템은 가스탱크로부터 가스 누설이 선박 및 인체 또는 환경에 위험을 주지 않도록 설계 되어야 하며 다음과 같은 잠재된 위험으로부터 안전한 설계를 하여야 한다.

- 허용치 아래의 온도로의 선박 재료의 노출
- 착화원이 있는 위치에 인화성의 연료 산포

가스 연료 탱크의 압력 및 온도는 가스 저장 시스템의 설계 기준 내에서 유지되어야 한다.

일반적인 주요 요구 사항을 살펴보면, 액화 천연 가스는 10 barg의 최고 허용 안전 압력 하에서 저장되어야 한다. 액화 가스 저장 탱크가 개방갑판(open deck)위에 설치되는 경우에는 선박 강재는 탱크 연결부와 다른 누설의 원천으로부터 보호되어야 한다.

(2) 가스 저장 탱크 종류

국제 해사 기구(IMO) IGF 코드에서는 가스 연료 추진 선박에 설치되는 가스 저장 탱크의 종류 및 각 탱크에 대한 설계 기준을 언급하고 있다. 여기에서는 각 탱크의 설계 기준에 대한 주요 내용을 살펴보면 다음과 같다.

(가) 타입 A 독립 탱크(Type A Independent tank) 설계 기준 및 구조해석

타입 A 독립 탱크는 각 선급 및 인정된 기관의 요구사항에 따라 기존의 선박 구조 해석 절차를 이용하여 설계되는 탱크이며, 설계 증발 압력(P_o)는 0.07 MPa보다 작아야 한다.

대기압 하에서 액화 가스 온도가 -10°C 이하인 경우에는 완전한 이차 장벽 (complete secondary barrier)가 요구되며, 이런 경우에 대한 선체 구조는 아래 요구 사항을 만족하여야 한다.

- 선체 소재는 대기압에서 액화 가스 연료 온도에 적절한 소재이어야 한다.
- 이러한 온도에서 허용할 수 있는 선체 응력을 초과하지 않도록 설계를 해야 한다.

구조 해석은 탱크 내부 압력 및 상호하중(interaction load)을 고려 수행되어야 한다. 지지대 위에 있는 탱크는 우발하중(accidental load)을 고려해서 설계되어야 한다.

진공으로 보온되는 탱크의 경우, 지지대 설계의 강도 및 안쪽벽과 바깥쪽벽 사이의 지지대 설계를 고려해야 한다.

(나) 타입 B 독립 탱크(Type B Independent tank) 설계 기준 및 구조해석

타입 B 독립 탱크는 응력 레벨, 피로 수명(fatigue life) 및 균열전파 특성 (crack propagation characteristics)을 결정하기 위한 모델 테스트, 분석 기구 및 해석 방법을 이용하여 설계되는 탱크이며, 설계 증발 압력(P_o)는 0.07 MPa 보다 작아야 한다.

대기압 하에서 액화 가스 온도가 -10°C 이하인 경우에는 보호 시스템을 가진 부분적인 이차 장벽(partial secondary barrier)이 요구되며, 작은 누출 보호 시스템이 설계되어야 한다.

구조해석에 대한 요구 사항을 살펴보면, 구조의 적절성을 결정하기 위해서 아래와 같은 사항에 대해서 동하중, 정하중의 효과가 고려되어야 한다.

- 플라스틱 변형(Plastic deformation)
- 좌굴(buckling)
- 피로 파괴(fatigue failure)
- 균열 전파(crack propagation)

Fig. 3.15와 Fig. 3.16은 선박에 설치되는 타입 A와 B 독립 탱크의 구조를 보여준다.

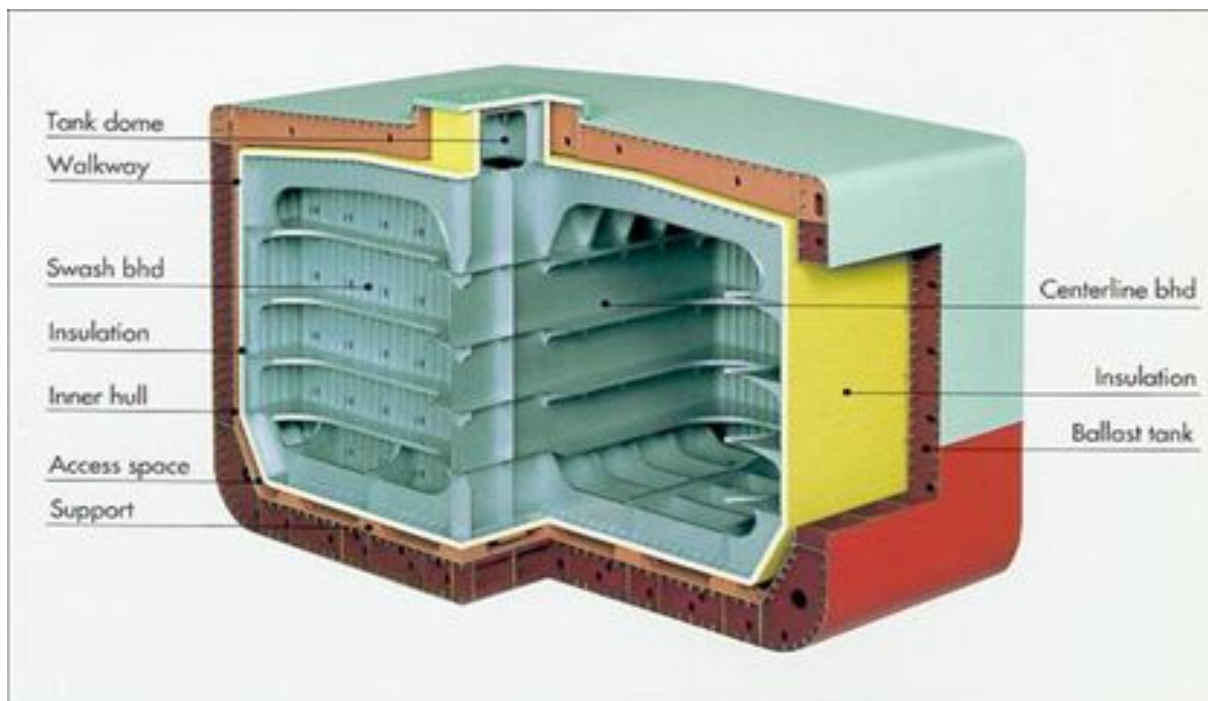


Fig. 3.15 prismatic tank—courtesy of IHI marine United Inc.^[36]

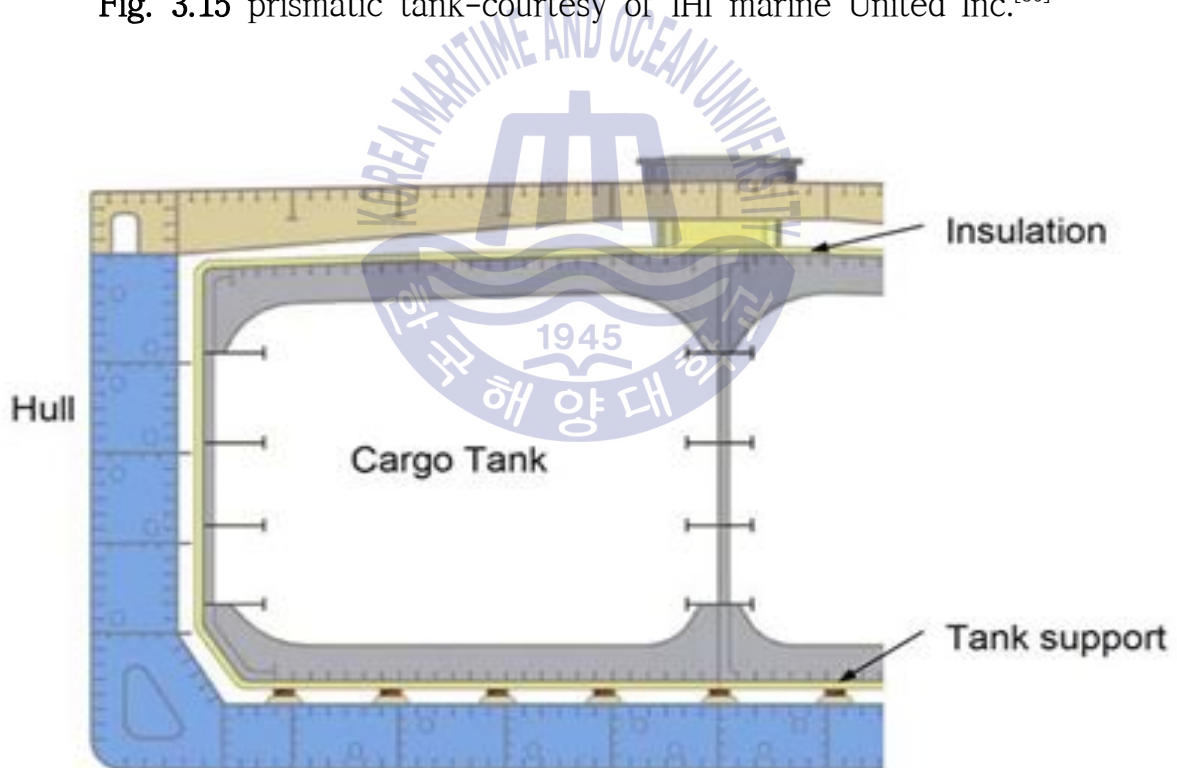


Fig. 3.16 Prismatic Tank Construction^[36]

(다) 타입 C 독립 탱크(Type C Independent tank) 설계기준 및 구조해석

타입 C 독립 탱크의 설계는 파괴 역학(fracture mechanics)와 균열 전파(crack propagation)기준이 포함된 압력 용기 기준에 따라 설계되어야 한다.

설계 증발 압력은 최소한 다음 압력을 가져야 한다.

$$p_0 = 0.2 + AC(\rho_r)^{1.5} \text{ (Mpa)}$$

where:

$$A = 0.00185((\sigma_m / \Delta \sigma_A))^2$$

with

σ_m = design primary membrane stress

$\Delta \sigma_A$ = allowable dynamic membrane stress(double amplitude at probability level $Q = 10^{-8}$)

55 N/mm² for ferritic-perlitic, martensitic and austenitic steel

25 N/mm² for aluminium alloy (5083-0)

C = a characteristic tank dimension to be taken as the greatest of the following: h, 0.75b or 0.45l

h = height of tank(dimension in ship's vertical direction) (m)

b = width of tank(dimension in ship's transverse direction) (m)

l = length of tank(dimension in ship's longitudinal direction) (m)

ρ_r = the relative density of the cargo (ρ_r = for fresh water) at the design temperature.

When a specified design life of the tank is longer than 10^8 wave encounters $\Delta \sigma_A$ shall be modified to give equivalent crack propagation corresponding to the design life.

압력 용기 두께는 계산시 용기의 성형 후의 최소 두께를 고려해야 하고, 강의 종류에 따라 아래와 같이 최소 두께를 가져야 한다.

- 카본 망간나이즈(C-Mn), 니켈강: 5 mm
- 오스테나이트(Austenitic)강: 3 mm
- 알루미늄(aluminium)강: 7 mm

설계 액체 압력이 내부 압력 계산시 고려되어야 하고, 압력 용기의 좌굴을 검토하는데 사용되는 설계 외부 압력(Pe)은 최소한 아래와 같은 압력을 가져야 한다.

$$P_e = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \text{ MPa} \quad (3.2)$$

Where:

P_1 = setting value of vacuum relief valves. For vessels not fitted with vacuum relief valves P_1 shall be specially considered, but should not in general be taken as less than 0.025 MPa

P_2 = the set pressure of the pressure relief valves (PRVs) for completely closed spaces containing pressure vessels or parts of pressure vessels; elsewhere $P_2 = 0$.

P_3 = compressive actions in or on the shell due to the weight and contraction of thermal insulation, weight of shell including corrosion allowance and other miscellaneous external pressure loads to which the pressure vessel may be subjected. These include, but are not limited to, weight of domes, weight of towers and piping, effect of product in the partially filled condition, accelerations and hull deflection. In addition, the local effect of external or internal pressures or both shall be taken into account.

P_4 = external pressure due to head of water for pressure vessels or part of pressure vessels on exposed decks; elsewhere $P_4 = 0$.

탱크 C 타입 탱크 설계시 소성 변형, 좌굴 하중, 피로 설계 조건, 돌발적인 설계 조건 등을 고려하여야 한다.

소성 변형(plastic deformation)는 허용 응력이 아래 식 결과를 초과하지 않아야 한다.

$$\begin{aligned}
\sigma_m &\leq f \\
\sigma_L &\leq 1.5f \\
\sigma_b &\leq 1.5f \\
\sigma_L + \sigma_b &\leq 1.5f \\
\sigma_m + \sigma_b &\leq 1.5f \\
\sigma_m + \sigma_b + \sigma_g &\leq 3.0f \\
\sigma_L + \sigma_b + \sigma_g &\leq 3.0f
\end{aligned}$$

where:

σ_m = equivalent primary general membrane stress

σ_L = equivalent primary local membrane stress

σ_b = equivalent primary bending stress

σ_g = equivalent secondary stress

f = the lesser of (R_m/A) or (R_e/B)

좌굴 하중 기준은 외부 압력과 압축 응력을 야기한 다른 하중을 받는 압력 용기의 두께 및 성형은 인정하는 압력 용기 좌굴 이론을 이용한 계산이어야 한다.

피로 설계 조건에서는 대기압 하에서 액화 가스 연료가 -55°C 이하인 타입 C 독립 탱크에 대해서, 탱크 크기, 형상, 지지대의 배치 등에 따른 정적 및 동적 응력에 관해서 추가적인 검증이 요구된다. 탱크 및 지지대는 돌발적인 하중을 고려해야 설계하여야 한다.

(라) 멤브레인 탱크(Membrane tanks) 설계 기준 및 구조해석

멤브레인 저장 시스템의 설계시 온도, 팽창과 수축이 보정되어야 한다. 대기압에서 액화 가스 연료 온도가 -10°C 이하인 경우에는 완전한 이중 장벽이 요구된다.

설계 증발 압력(P_o)은 일반적으로 0.025 MPa 를 초과하지 않아야 한다. 만약 지지하는 온도 보온의 강도에 대해서 선체 부재 치수(hull scantling)가 증가되는 경우에는 설계 증발 압력은 증가될 수 있으나 0.07 MPa 를 초과할 수 없다. 일반적으로 멤브레인의 두께는 10 mm 를 초과하지 않아야 한다.

액체 밀폐의 손실을 야기시키는 잠재적 사고가 설계시 검토되어야 하며, 다음과 같은 사항들이 포함되어야 한다.

- 극한 설계 사고

- 멤브레인 인장 사고(Tensile failure of membranes)
- 단열재의 압축 붕괴(Compressive collapse of thermal insulation)
- 열적 노화(Thermal aging)
- 단열재와 선체구조 사이의 부착물의 손실(Loss of attachment between thermal insulation and hull structure)
- 멤브레인에서 단열재 시스템의 부착물의 손실(Loss of attachment of membranes to thermal insulation system)
- 내부구조와 지지대의 구조 안정성(Structural integrity of internal structures and their supports)
- 선체 구조 지지물의 사고(Failure of the supporting hull structure)

- 피로 설계 사고

- 선체 구조에 부착물과 조인트를 포함하는 멤브레인의 피로(Fatigue of membranes including joints and attachments to hull structure)
- 단열재의 피로 균열(Fatigue cracking of thermal insulation)
- 내부 구조와 지지대의 피로(Fatigue of internal structures and their supports)
- 평형수 유입을 야기하는 내부 선체의 피로 균열(Fatigue cracking of inner hull leading to ballast water ingress)

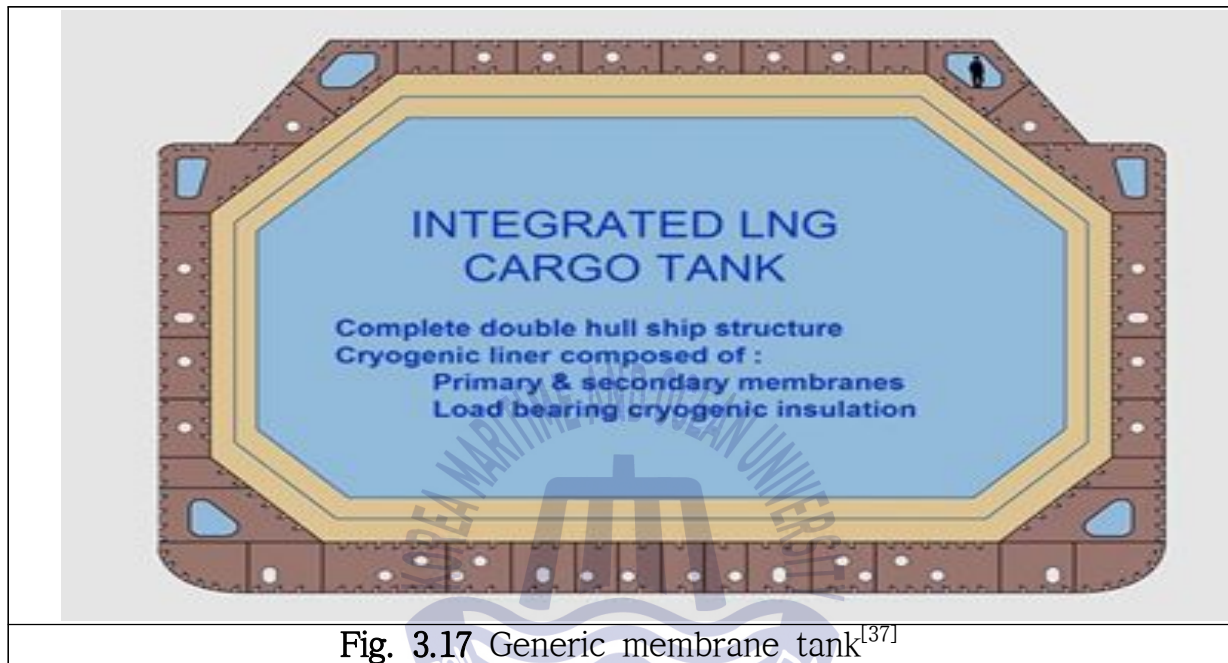
- 돌발적인 설계 사고

- 돌발적인 기계의 손상(Accidental mechanical damage)
- 단열재 공간의 돌발적인 압력 증가(Accidental over pressurization of thermal insulation spaces)
- 탱크내의 돌발적인 진공(Accidental vacuum in the tank)
- 내부 선체 구조를 통한 물 침투(Water ingress through the inner hull structure)

액화 가스 연료 저장 및 관련된 구조, 예를 들면, 펌프 및 지지 구조의 극한 강도 및 피로 평가를 결정하기 위한 목적으로 구조 해석 및 테스트를 수행하여야 한다.

선체의 구조 해석시 내부 압력을 고려하여야 하고 선체의 변형과 멤브레인과의 호환성을 고려해야 한다.

Fig. 3.17와 Fig. 3.18은 선박에 설치되는 멤브레인 탱크의 구조를 보여준다.



3.4.5 기관구역 밖의 연료 병커링 시스템 및 분배시스템

(1) 병커링 시스템

연료병커링 장소는 자연통풍이 충분한 곳에 위치하여야 한다. 폐위 혹은 반폐 위된 병커링 장소는 특별한 고려를 하여야 한다. 병커링 장소는 거주구역, 화물/작업 구역 및 제어실로부터 물리적으로 분리되거나 구조적으로 보호되어야 한다. 가스 배관에서의 어떠한 손상도 선박의 가스 저장 탱크에 손상을 일으켜 가스 배출이 통제되지 못하는 일이 발생하지 않도록 연결구 및 배관을 설치하여야 한다.

액화가스 병커링 연결구 하부 및 누설이 발생할 가능성이 있는 곳 하부에 드립트레이가 설치되어야 한다. 드립트레이의 재료는 스테인리스이어야 하며 배관에 의해 누설된 액화가스가 선박의 현측으로부터 적절히 해수면으로 흘러내릴 수 있어야 한다. 그 배관은 병커링 작업시에 일시적으로 설치될 수 있다. 액화 가스의 누설 시, 근방의 선체 및 갑판 구조는 허용되지 않는 냉각에 노출되지 않아야 한다. 압축가스 병커링 장소의 경우, 주변 선체 구조에 영향을 미치는 콜드제트 (cold jet)가 빠져나가는 것을 방지할 수 있도록 저온강보호(Low Temp. steel shielding)가 공급되어야 한다.

병커링의 제어는 병커링 작업에 대하여 안전한 장소에서 가능하여야 한다. 그러한 장소에서 압력 및 탱크 액위가 감시되어야 한다. 또한 넘침 정보 및 자동 폐쇄가 제어장소에 표기되어야 한다.

병커링시스템은 가스를 저장탱크에 주입하는 동안에는 공기 중에 가스가 배출되지 않도록 배치되어야 한다.

수동 작동 정지밸브 및 원격제어 정지밸브가 직렬로 배치되거나 원격조작과 수동조작 겸용의 밸브가 육상연결지점에 근접하여 각각의 병커링 라인에 설치되어야 한다. 원격조작밸브는 병커링 작업을 위한 제어 장소 또는 기타 안전한 장소에서 조작이 가능하여야 한다.

가스 병커링 라인을 둘러싸고 있는 덕트내의 통풍이 정지할 경우, 가시가청경보장치가 병커링 제어장소에 제공되어야 한다.

가스 병커링 라인을 둘러싸고 있는 덕트 내에 가스가 검지될 경우, 가시가청

경보가 병커링 제어장소에 제공되어야 한다.

병커링 작업의 완료 후 병커링 배관으로부터 드레인을 할 수 있는 수단이 제공되어야 한다. 병커링 라인은 불활성가스 주입 및 가스프리가 가능도록 배치되어야 한다. 선박의 운항 중, 병커링 배관은 가스프리상태이어야 한다.

Fig. 3.19는 국제해사기구 요구 사항에 만족하는 일반적인 병커링 방법을 나타낸 그림이다.

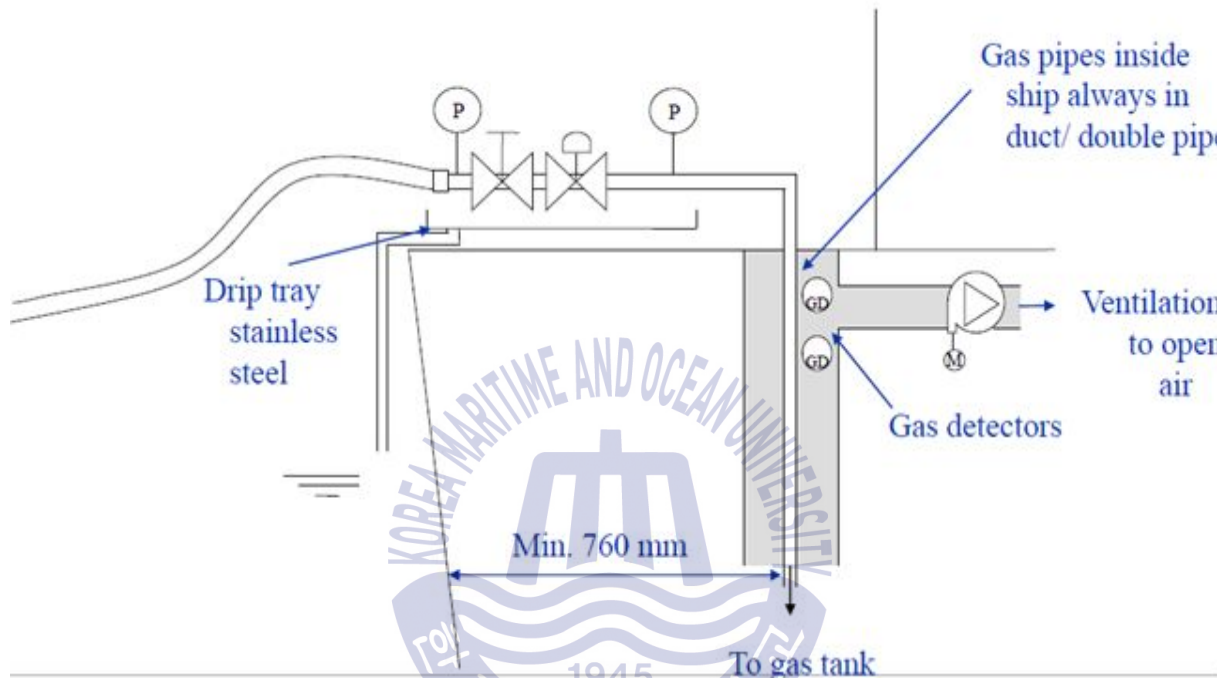


Fig. 3.19 Schematic bunkering arrangement^[38]

(2) 분배 시스템

가스연료배관은 거주구역, 업무구역 혹은 제어장소로 유도되지 않아야 한다. 가스배관이 선내의 폐위구역을 통하여 지나가는 경우, 가스배관은 덕트로 폐위되어야 한다. 그 덕트는 시간당 30회 이상 부압의 상태에서 기계적으로 환기가 되어야 한다.

덕트에 대한 통풍 개구 입구는 대기 중에 위치하여야 하며, 발화원으로부터 격리되어야 한다. 대기 중에 위치한 가스배관은 기계적인 충격에 의한 손상이 발생할 가능성이 없는 장소에 위치하여야 한다.

가스 연료 엔진이 있는 기관구역 외부의 고압가스 배관은 파열시에 인명의 안전을 최소화할 수 있는 곳에 설치되고 보호되어야 한다.

제 4 장 가스 공급 시스템 운전 특성 연구

4.1 가스연료선박용 가스공급시스템

가스전에서 얻어진 천연가스를 저장과 이송을 용이하게 하기 위해서 -163°C 의 극저온 상태로 액화시킨 LNG를 선박의 엔진에 공급하기 위해서는 엔진에 요구되는 온도(약 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$)까지 상승시켜야 한다. 이때 엔진의 폐열이나 고온의 증기를 사용해 상온의 천연가스 상태로 만들어주기 위해서는 일종의 열교환기인 기화기(vaporizer)가 필요하고, LNG가 기화기를 통과하면서 상온의 천연가스로 바뀐 후 엔진으로 공급된다.

천연가스를 연료로 사용하게 된 상선은 초기에는 LNG 운송선에서 BOG(Boil Off Gas)를 처리하기 위한 것이었으나, LNG의 주기관이 증기터빈기관에서 디젤엔진기관으로 변화하면서 가스디젤엔진이 이용되고 있다. 하지만 국제유가상승과 온난화 현상으로 인해 전 세계적으로 환경규제로 인해 모든 산업 분야에서 청정에너지로의 전환이 요구되면서 LNG 운송선 이외의 선박에서도 가스디젤엔진의 이용이 지속적으로 검토되게 되었다. 가스를 추진연료로 사용하는 선박에서 요구되는 선박의 크기 및 종류에 따라 고압 가스분사방식 엔진과 저압 분사방식 엔진으로 나눈다.

가스연료선박용 연료 공급 시스템은 엔진으로 공급되는 압력과 온도, 유량에 따라 고압 방식 공급 시스템과 저압 방식 공급 시스템으로 나눈다. 구성요소는 크게 차이가 없지만, 고압방식은 저압방식과 달리 엔진으로 약 300 barg, $30^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 정도의 천연가스가 공급되기 때문에 압력상승을 위한 고압펌프가 추가로 구성된다.

Fig. 4.1, Fig. 4.2 및 Fig. 4.3은 고압방식 연료 공급 시스템의 도식도를 나타내고 있으며, 주요 구성품으로 연료저장탱크, 저압펌프, 고압펌프 및 기화기 등으로 구성되어 있다. 고압방식의 경우, LNG가 저장된 탱크에서 저압펌프를 통과 후 고압펌프로 전달되면서 200~350 barg의 압력으로 승압되고 이후 고압용 기화기를 통해 40°C 이상의 온도로 상승하여 천연가스로 기화되게 된다.

고압방식 연료 공급 시스템의 경우 에너지 효율이 높다는 장점이 있지만 고압

의 가스압력을 생성해야하기 때문에 별도의 고압펌프가 추가로 설치된다. 엔진으로 공급되는 천연가스의 온도는 글리콜 워터(glycol water)의 유량에 의해 조정되고 압력은 고압방식의 경우 고압펌프에 의해, 저압방식의 경우 저압펌프 또는 PBU (Pressure Build-up Unit)에 의해 조정이 가능하다.

Fig. 4.4, Fig. 4.5 및 Fig. 4.6은 저압 방식 연료 공급 시스템의 도식도를 나타내고 있다. 저압방식 연료 공급 시스템의 경우 엔진으로 4~5 barg, 20~30℃의 천연가스가 공급되므로 고압펌프가 없이 저압펌프만으로도 시스템 구성이 가능하고 저장탱크가 국제해사기구(IMO) 타입 C 탱크가 설치되는 경우 저압펌프가 없이 PBU가 설치되어 있어 저장 탱크내부 압력을 엔진으로 공급되는 압력보다 높게 유지함으로써 엔진으로 약 5 barg의 천연가스 공급이 가능하게 된다. 이와 같이 저압방식의 경우 고압펌프 등의 추가구성이 필요하지 않아 시스템을 비교적 간단하게 구성할 수 있다는 장점을 가지고 있다.^[39]

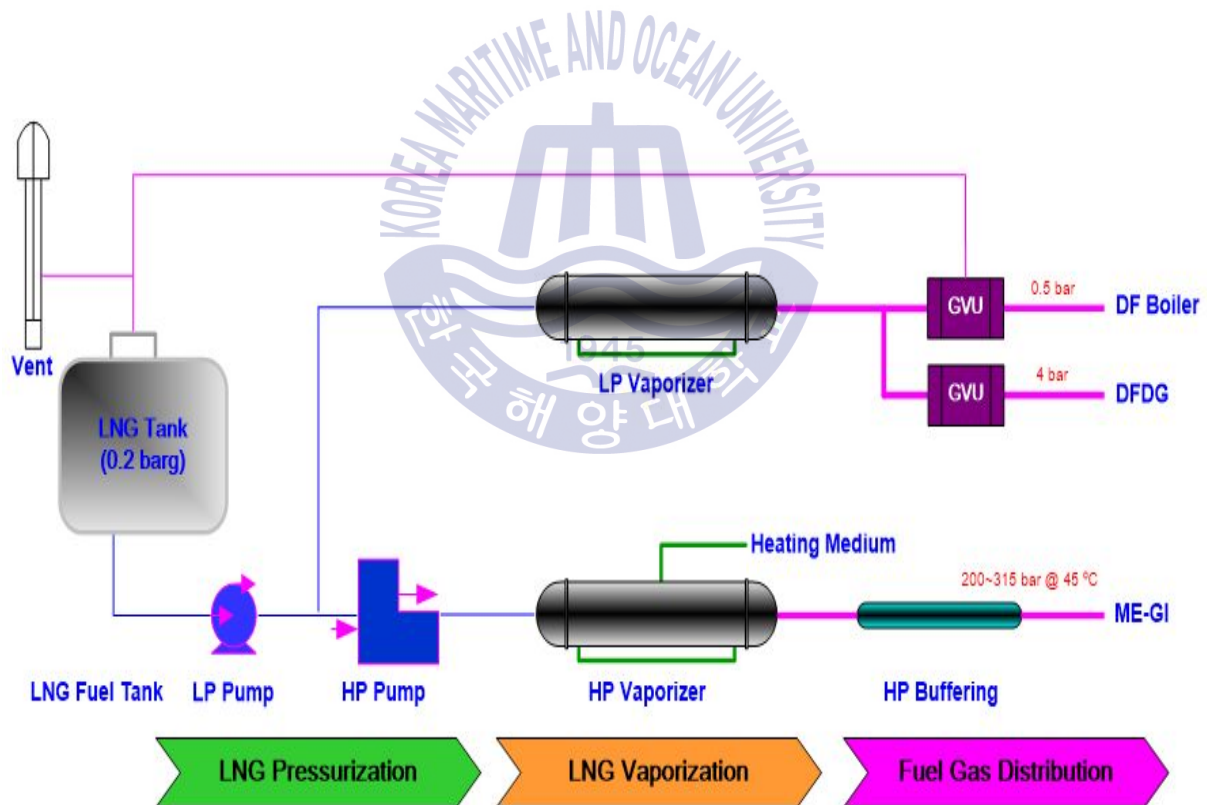


Fig. 4.1 Diagram of high pressure gas supply system^[39]

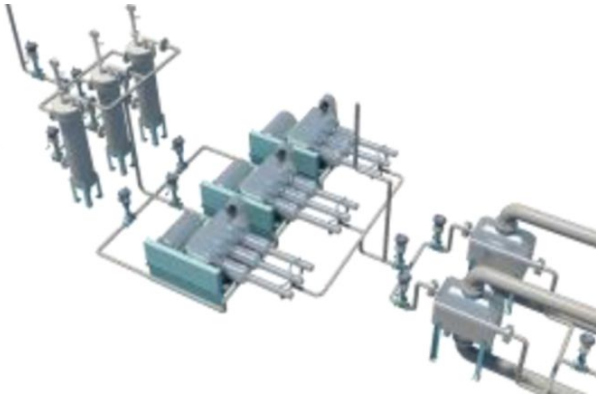


Fig. 4.2 High pressure gas supply system of STX(FuSion™)^[39]

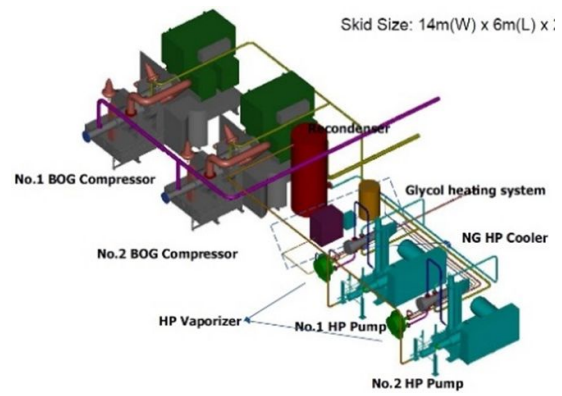


Fig. 4.3 High pressure gas supply system of DSME^[39]

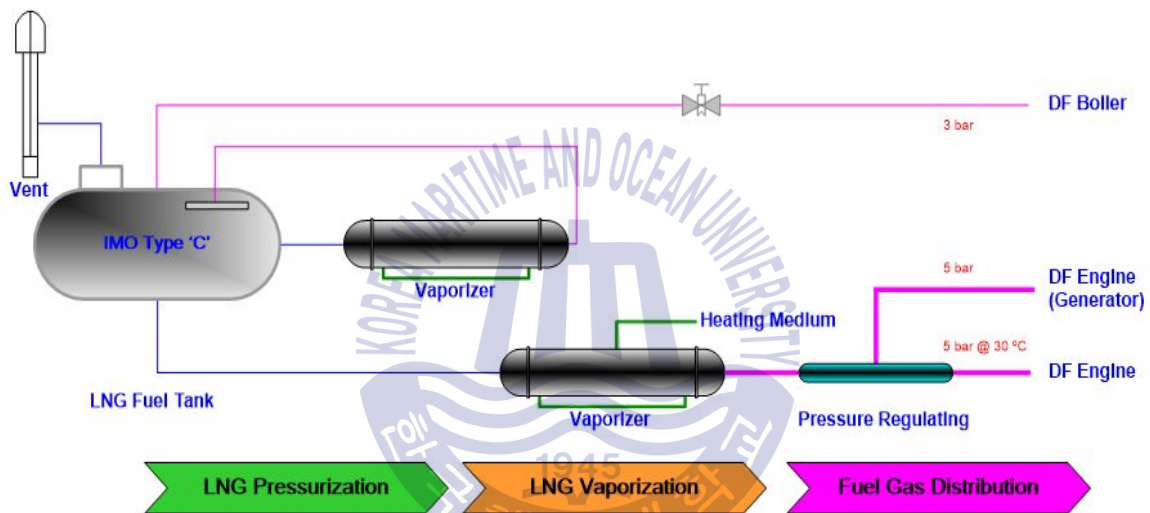


Fig 4.4 Diagram of low pressure gas supply system^[39]

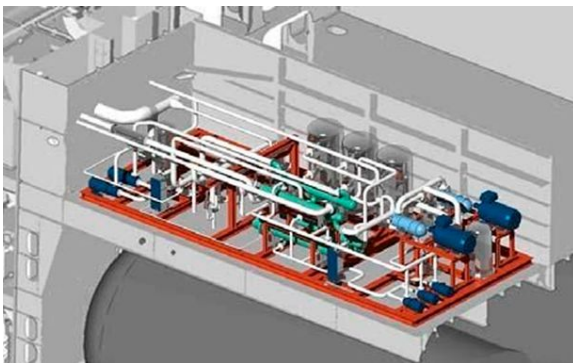


Fig. 4.5 Low pressure gas supply system of TGE^[39]

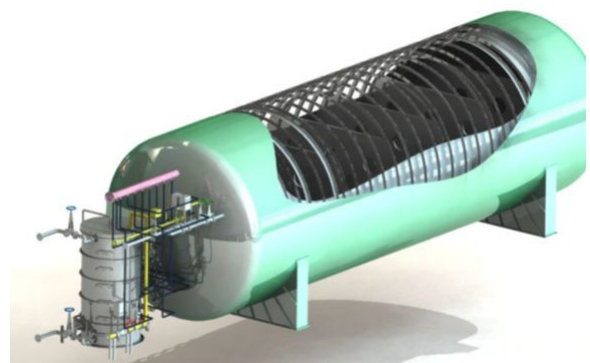


Fig. 4.6 Low pressure gas supply system of SHI(FUGaS)^[39]

4.2 시스템 운전 해석 및 안정성 평가

서론에서 언급한 바와 같이 현재 적용 선박의 장시간 운전 실적이 없어서 가스 공급 시스템이 여러 운전 조건에서 안정적으로 운전이 가능한지에 대한 운전 해석 검토가 필요하며, LNG 병커링 인프라가 안정적으로 확보되지 않은 현실에서 적절한 병커링 시기를 예측할 필요가 있다.

4.2.1 대상 선박 및 LNG 연료 선정

시스템 운전 해석 평가를 위한 대상 선박은 인천항만공사에서 운영하는 에코누리호로 선정하였다. 에코누리호는 아시아 최초의 LNG 연료 추진 선박으로써 DFDE(Dual Fuel Diesel Engine) 방식을 채택하였다. 본선은 20 m³(IMO type-c) 탱크, 기화기, 발전기(Wartsila 9L20DF, 1,584 kW), GVU(Gas Valve Unit), 추진 모터(STADT, 700 kW, 2 sets)를 탑재 하였다. 항해가능거리는 895 km로 알려져 있다. 발전기의 부하에 따른 연료 소모량은 다음 표와 같다. 발열량 조건은 한국가스공사 홈페이지 LNG 환산표에 따라 54.86 MJ/kg을 적용하였다. 또한 가스 소모량은 Wartsila사의 20DF 지침서(engine guide book)를 적용하였다. Table 4.1은 엔진 부하별 가스 소모량을 나타낸 것이다.^[40]

Table 4.1 Fuel gas consumption^[40]

	Gas consumption (kJ/kWh)	Gas consumption (g/kWh)	Gas consumption (kg/h)
100% (1,584 kW)	8500 kJ/kWh	154.93 g/kWh	245.40 kg/h
75% (1,188 kW)	9361 kJ/kWh	170.63 g/kWh	202.70 kg/h
50% (792 kW)	10516 kJ/kWh	191.68 g/kWh	151.81 kg/h

위 계산에 따라 최대 부하시 245.40 kg/h의 가스를 소모하는 것으로 계산되었다.

가스연료를 사용하는 디젤기관의 경우 폭발을 위하여 파일렛 오일이 필요하다. 따라서 에코누리호의 최대 운항시간을 산출하기 위해서는 파일렛 오일의 소모량 또한 중요한 요소이다. Table 4.2는 엔진 부하별 파일렛 오일의 소모량을 나타낸 것이다.

Table 4.2 Pilot oil consumption^[40]

	Pilot oil consumption (g/kWh)	Pilot oil consumption (kg/h)	Max. allowable operation hours
100% (1,584 kW)	4.8 g/kWh	7.603 kg/h	907 hour
75% (1,188 kW)	6.3 g/kWh	7.484 kg/h	921 hour
50% (792 kW)	9.5 g/kWh	7.524 kg/h	920 hour

Wartsila의 20DF 엔진 지침서를 토대로 계산하였다. 시간당 소모량 MCR 기준 7.603 kg/h임으로 에코누리호에 탑재 가능한 디젤오일은 6.9 ton(7.9 m³, 비중 0.88 적용) 임으로 최대 921시간 까지 운항 가능 하다.

사용되는 선박의 LNG 전량 한국가스공사에서 공급하고 있다. 따라서 LNG는 한국가스공사 수입량의 22.9%를 차지하고 있는 Qatar산 LNG 조성으로 하였다. Table 4.3은 Qatar산 LNG의 조성 비율을 나타낸 것이다.

Table 4.3 Qatar LNG composition^[40]

Composition	Ratio %
Methane	89.18
Ethane	7.07
Propane	2.50
n-Butane	0.69
I-Butane	0.46
n-Pentane	0.01
Nitrogen	0.09

4.2.2 시스템 공정을 위한 조성비 및 초기조건

본 시스템 특성분석에서는 압력과 온도가 각각 -163°C , 6.5 barg인 LNG를 25°C , 5 barg의 천연가스로 기체화 시킨 후 DF엔진으로 공급하는 저압방식 시스템을 Fig. 4.7과 같이 구성하였다.

Table 4.4는 시스템의 설계 기준 및 목적을 나타내고 있다. 이를 통하여 DF엔진으로 공급되는 천연가스의 온도와 압력을 기준으로 압력과 유량 등의 운전조건을 입력하여 공급시스템을 구성하고 설계변수를 도출하였다. Table 4.5는 시간당 250톤 ~ 350톤의 LNG를 공급할 수 있는 시스템을 구성하기 위한 관련 장치 및 초기조건들을 나타내고 있다.^{[39],[41],[42]}

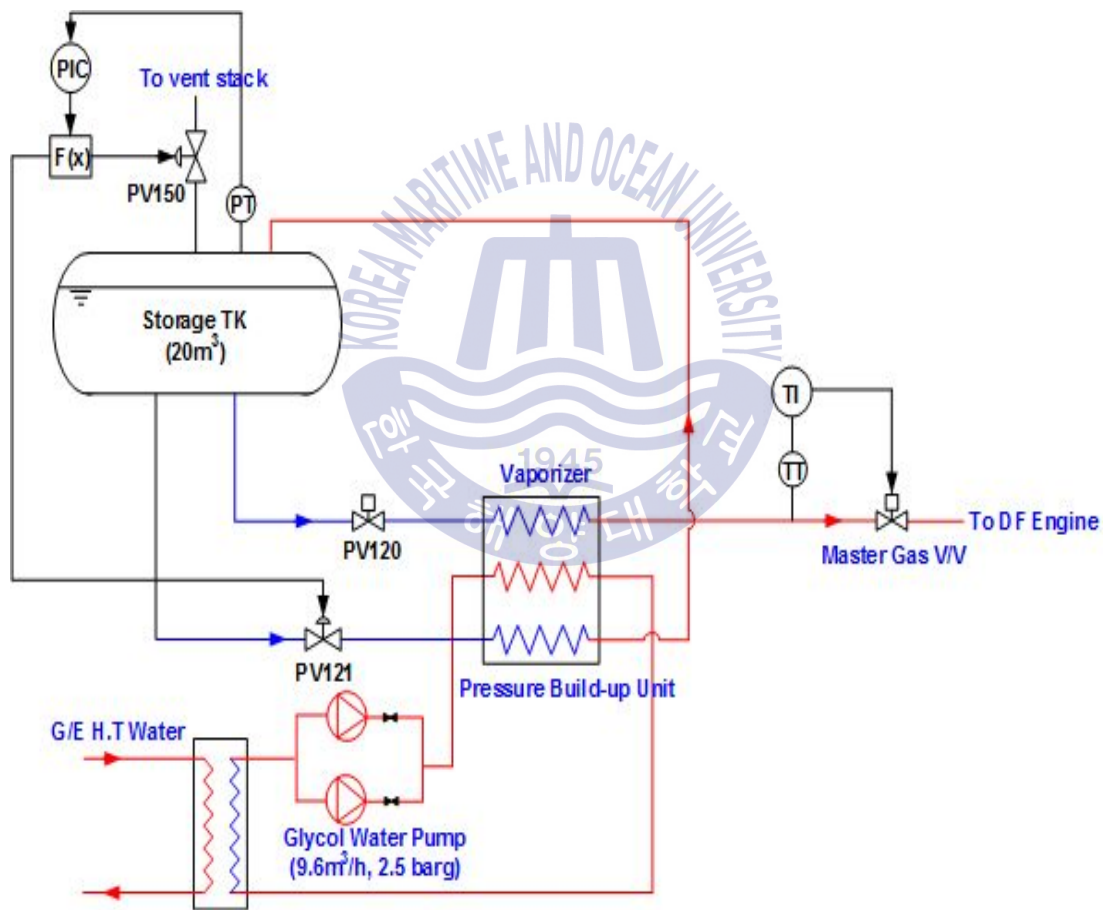


Fig. 4.7 Diagram of low pressure fuel supply system^{[39],[40],[42]}

Table 4.4 Design criteria and purpose of low pressure DF engine^{[39],[41]}

Medium	• Natural gas
Pressure	• 5 barg at normal conditions
Temperature	• 20°C

Table 4.5 Initial criteria of fuel supply system^{[39],[41]}

Unit operation	Modeling parameters
Cargo Tanks	<ul style="list-style-type: none"> • Cargo tank volume and filling ratio (95% Filling, Bunkering at 30%) • Operating pressure(6.5 bar) • Compositions of cargo LNG • Heat ingress into the cargo tanks • Placement (elevation) of feed and product nozzles, etc.
Glycol water pump	<ul style="list-style-type: none"> • Not considered
VOP/PBU	<ul style="list-style-type: none"> • Thermal and hydraulic calculation outputs including heat transferred (Q), LMTD, heat transfer coefficient (U) as an average, heat transfer surface (A), calculated pressure drop, etc. • Geometrical information of heat exchanger, etc.
Control valve	<ul style="list-style-type: none"> • Rated C_v (flow coefficient) • Flow characteristics
PID controller	<ul style="list-style-type: none"> • Process variable/Output/Set point • PID value, etc.

4.2.3 시스템 특성 분석

Fig. 4.8은 HYSYS 프로그램을 이용해 LNG연료를 DF 엔진의 연료 공급 시스템을 나타내고 있다. DF엔진으로 공급되는 천연가스의 압력을 유지해주기 위하여 필요한 PBU(Pressure Build-up Unit)으로 LNG 저장탱크에서 나온 LNG가 기화기(Vaporizer)를 통해 DF엔진으로 공급되고 PBU를 통해 다시 LNG 저장탱크로 되돌아오면서 저장탱크의 압력을 6.2 barg로 일정하게 유지하도록 구성하였다.^[39]

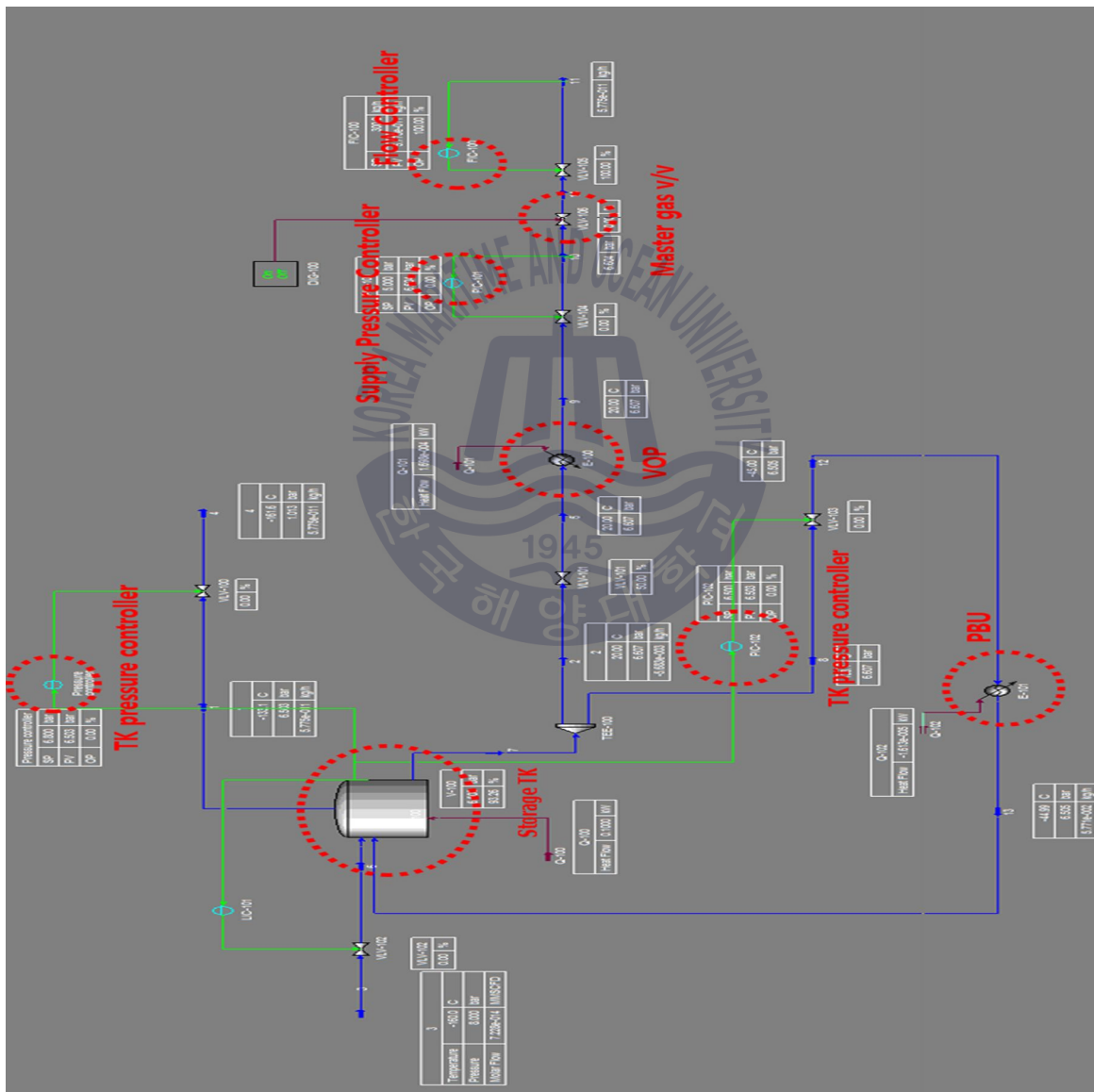


Fig. 4.8 Low pressure DF engine system by HYSYS^[39]

실제 초기 가동 절차는 글리콜 워터 펌프와 같은 보조기기뿐만 아니라 냉각 (Cool Down¹⁾) 과정을 거쳐야 한다. 하지만, 본 수치해석을 통한 특성 과정에는 이러한 냉각 과정은 고려하지 않았다.

정상 운전 부하(Normal operation Load) 동안에, 엔진 설계상 천연가스는 300 ton/h와 5 barg의 조건으로 DF엔진에 공급되어야 한다. 초기 시동(Initial Start-up) 및 정상 부하(Normal Load), 부하 감속(Load Down), 부하 증가(Load Up) 조건 설정 시 주요한 조건은 다음과 같다.^[39]

- 초기 시동 및 정상 부하시 주요 조건

- 초기 탱크수위(Tank Level)은 95%이며, 탱크압력은 6.5 barg로 설정되어야 한다.
- 주 가스밸브(Master Gas Valve)는 개방되어야 한다.

- 부하 감속(Load Down) 시 주요 조건

- 시스템 운전조건 변경을 위해, 정상 부하상태일 때의 조건은 안정화된 상태 이어야 한다.
- 유량조절기(Flow Controller)는 Table 4.1과 같이 부하에 따라 유량을 변경한다.

- 부하 증가시 주요 조건

- 시스템 운전조건 변경을 위해, 정상 감속 상태일 때의 조건은 안정화된 상태이어야 한다.
- 유량조절기는 Table 4.1과 같이 부하에 따라 유량을 변경한다.

1) Cool Down: -163°C의 LNG를 주입하기 전 설비보호를 위한 예냉작업을 말함

4.2.4 대상선박의 부하별 예상 속도 산출

대상 선박의 부하별 운항속도가 확인되어야 유량을 결정할 수 있다. 대상선박의 항해기록을 보유하고 있지 않아 표준적으로 사용되는 프로펠러 법칙에 따라 속도를 산출 하였다. Fig. 4.9와 Table 4.6은 에코누리호의 부하별 예상속도를 나타내며 에코누리호의 추진체계는 700 kW 추진모터 2 기가 장착되어 최대 속도 15 knots 항해가 가능하다고 가정하였다.

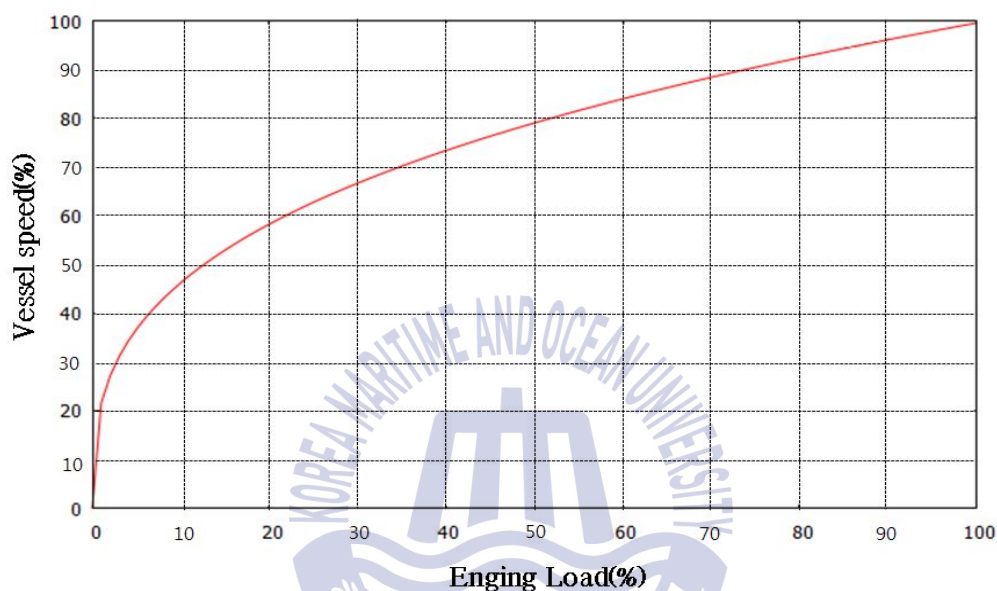


Fig. 4.9 Propeller curve^[40]

Table 4.6 Estimated econuri vessel speed by propeller curve^[40]

	MCR(100%)	NCR(75%)	Maneuvering(50%)
Engine load	1,400 kW	1,050 kW	700 kW
Ship speed	15.00 knots	13.62 knots	11.91 knots
Speed ratio according to propeller curve	100%	90.8%	79.4%

프로펠러 법칙에 따르면 부하 50%로 11.91 knots의 속력으로 항해가 가능하기 때문에 입출항시 조선에 문제가 없을 것으로 판단된다.

4.2.5 대상선박의 가상 항해 시뮬레이션

본 장에서는 저압 방식 가스 연료 공급 시스템이 적용된 운항선을 모델로 선정하여 아래 4가지 운전 조건에 따른 탱크 용량, 펌프 압력, 온도, 유량을 분석하여 각각의 특성을 파악하고자 한다.

(1) 에코누리호의 인천항 안내 항해

1) 운전 조건

에코누리호의 건조 목적인 인천항 내부의 안내 항해시를 예측하였다. 안내 항해시 1회 40분 정도 소요된다. 이때 출항 5분, 입항 5분, 항해 30분으로 추정하였다. 입출항시 부하를 주기관 출력의 50%로 가정하였으며 항해 30분의 경우 상용출력의 75%로 가정하여 항해 패턴을 예상하였다.

2) 운전 특성 분석

- Fig 4.10은 에코누리호가 인천항만내를 40분간 항해하였을 경우 탱크레벨, 엔진으로의 가스 소모량, 탱크 압력을 유지하기 위해 PBU를 통해 가스탱크로 가스 복귀를 나타낸 그래프이다.

- 5 분이 된 시점에 GVU를 개방하면 순간적으로 유량이 증가 하였으나 압력에는 큰 변화가 없었다. 10 분부터 주기관 운전을 시작하여 유량이 150 kg/h 정도로 큰 변화 없이 안정적으로 공급되었다.

- 15 분부터는 경제속력인 75%로 증속하였다. 증속 후에는 30분간 일정한 항해를 수행하였다. PBU를 통하여 LNG 저장탱크로 회수되는 유량은 부하가 증가함에 따라 증가되며 탱크내의 압력을 안정적으로 유지해 주었다. 이와 같이 1회 40분 운항시 0.34 m³의 연료를 소비한다. 따라서 1회당 연료 탱크 용적의 95%까지 병커링하고 30%에서 병커링 수행하는 것으로 예상하였을 때 22회 가량 항만안내 항해가 가능하다.

본 시스템의 압력, 온도의 변화 등을 고려하였을 경우 본 항만안내 항해를 수행하는데 있어 지장이 없는 것으로 검증 되었다.

Table 4.7은 항만 안내 항해 운전시 공급 유량, 공급 압력, 탱크 잔량 및 압력에 대한 최대, 최소, 평균값을 보여준다.

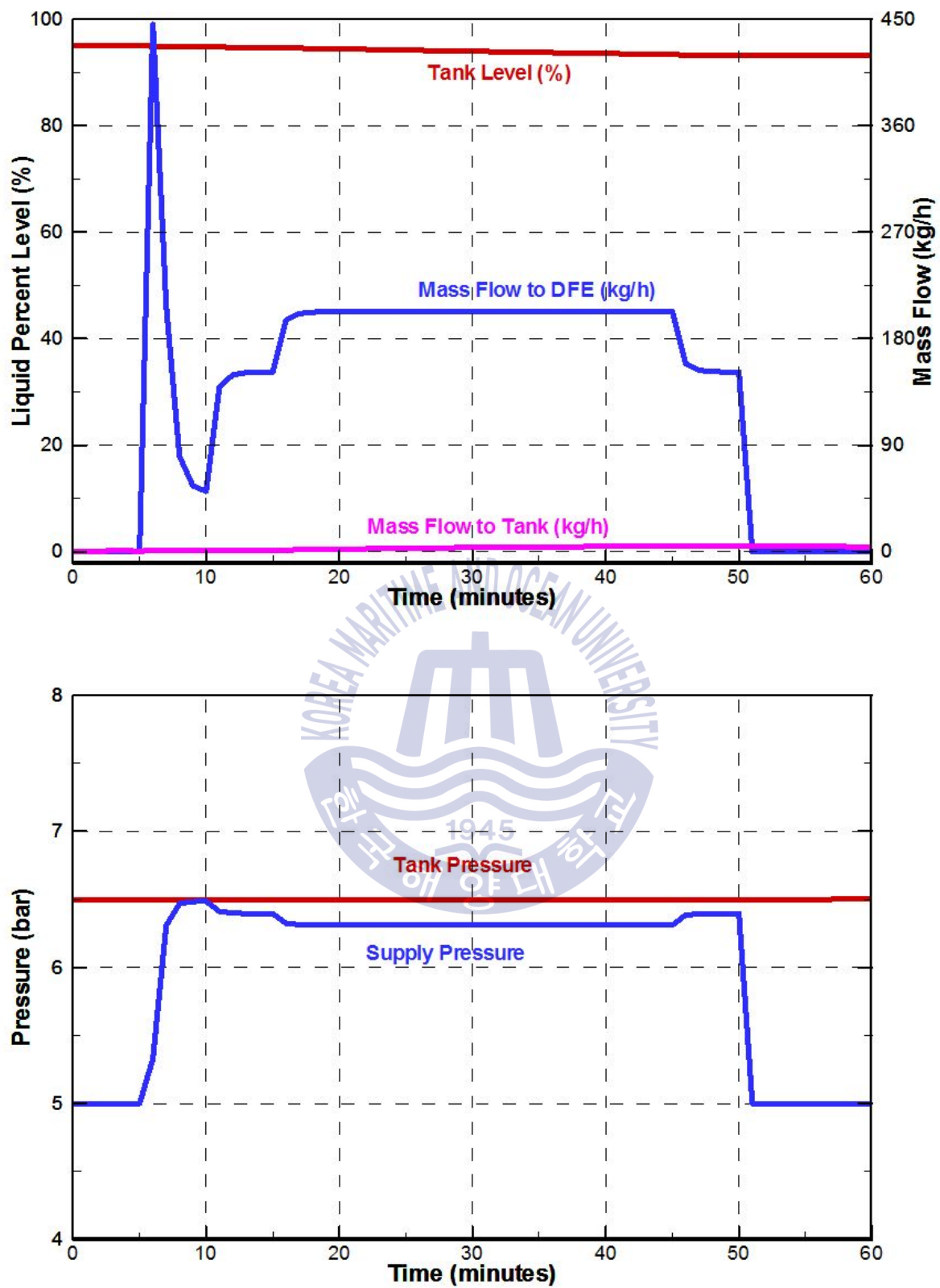


Fig 4.10 Fuel supply system characteristic curve in Incheon port^[40]

Table 4.7 Summary of operation status at case 1				
	Max	Min	Average (consumption)	Remarks
Supply pressure	6.31 barg	5.31 barg	6.33 barg	
Supply flow	202.7 kg/h	151.3 kg/h	189.3 kg/h	except for 445.7 kg/h, 5.3 barg at GVU open condition
LNG residual quantity	19 m ³	18.66 m ³	0.34 m ³	
Tank pressure	6.50 bar	6.49 bar		

(2) 에코누리호의 급격한 부하변동을 가정한 항외 항해

1) 운전 조건

에코누리호가 일반 항해가 아닌 항외를 운항한다는 가정으로 예측해 보았다. Fig. 4.11은 에코누리호의 급격한 부하변동을 가지고 항해하였을 경우에 탱크 레벨, 엔진으로의 가스 유량, 공급 압력 변동을 나타낸 그래프이다. 에코누리호는 인천항을 출항 후, 2시간 정도 협수로를 통과하여 전라북도 군산 앞바다까지 항해 하였다. 입출항시 부하는 50%로 가정하였으며 항해시에는 급작한 변침, 조선 등을 가정하여 90% 부하에서 70% 부하까지 급감, 또는 50% 부하에서 70%까지 증가시키는 급격한 부하변동 조건을 부여하여 대상 선박이 안정적인 항해를 수행 할 수 있는지 예상하였다.

2) 운전 특성 분석

본 케이스는 부하변동이 급작스럽게 발생하였을 경우를 가정해 보았다. 실제 선박이 운항 중 급격한 조선, 변침, 피항 등이 이루어지기 때문에 이러한 경우를 가정하여 시스템의 안정성을 검증해 보았다.

먼저 엔진으로 가는 유량은 GVU이 개방되어지는 순간 급격한 유량변동이 있었으나 압력은 큰 변동이 없었다. 이후 2시간 정도 협수로를 빠져나가기 위하여 50% 부하에서 70% 부하까지 급격한 가속과 감속을 수행하였다. 이때 압력은 큰 변동 없이 공급압력 6.0 barg ~ 6.5 barg를 만족하였다. 또한 항외

를 항해하다가 급격한 조선을 위하여 90% 부하에서 70%까지 부하까지 낮아지는 시뮬레이션을 통하여 압력과 유량이 변동 없이 유지하여 안정적인 항해가 가능하다는 것을 확인하였다. 이를 통하여 에코누리호가 항내를 벗어나 전라북도 군산 앞바다까지 문제없이 항해를 수행하고 인천항까지 복귀가 가능함을 확인하였다. 이때의 평균 이동 속도는 11.9 knots로 17시간 30분을 항해 할 수 있었다. 이때 연료 소모량은 8.6 m³을 소모하였다.

이를 통하여 에코누리호가 급격한 부하변동이 발생하더라도 시스템내의 안정적인 상태를 유지하는 것을 알 수 있었다. 이를 통하여 비상상황이 발생하더라도 안정적인 항해가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4.8은 공급 유량, 공급 압력, 탱크 잔량 및 압력에 대한 최대, 최소, 평균 값을 보여준다.

Table 4.8 Summary of operation status at case 2				
	Max	Min	Average (consumption)	Remarks
Supply pressure	6.48 barg	6.24 barg	6.32 barg	
Supply flow	234.01 kg/h	51.01 kg/h	196.20 kg/h	except for 445.7 kg/h, 5.3 barg at GVU open condition
LNG residual quantity	19 m ³	10.4 m ³	8.6 m ³	
Tank pressure	6.50 barg	6.49 barg		

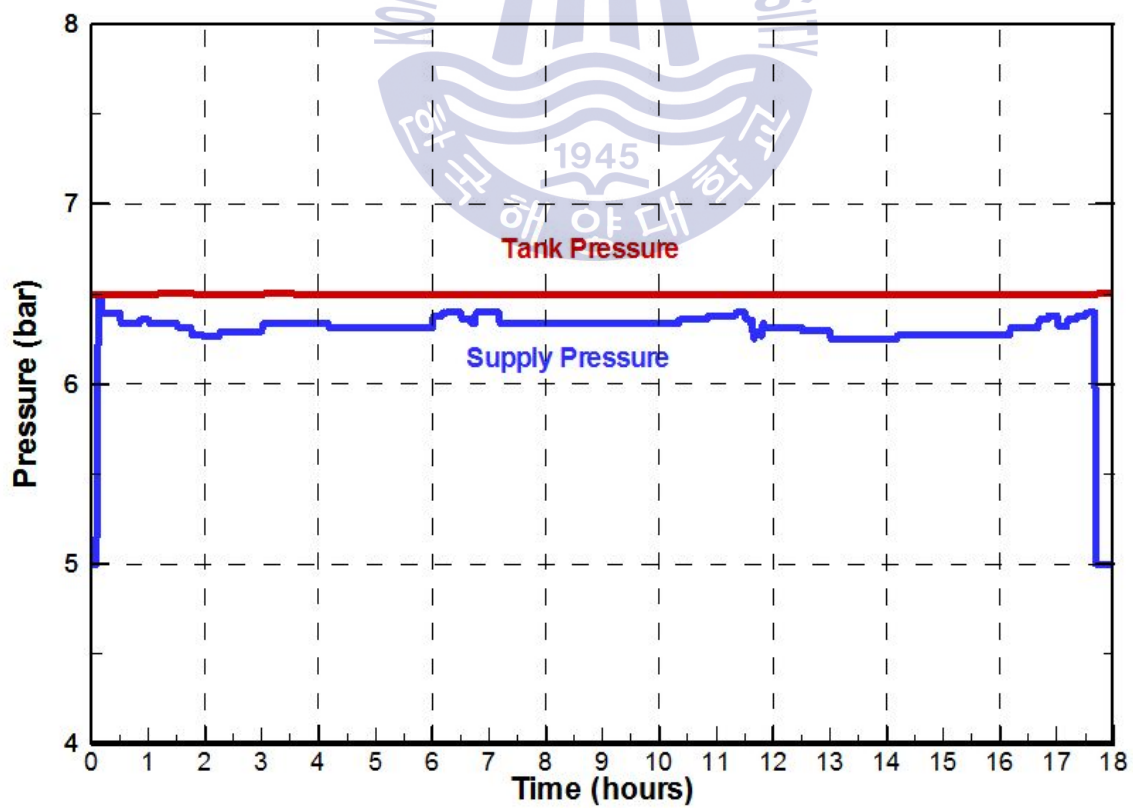
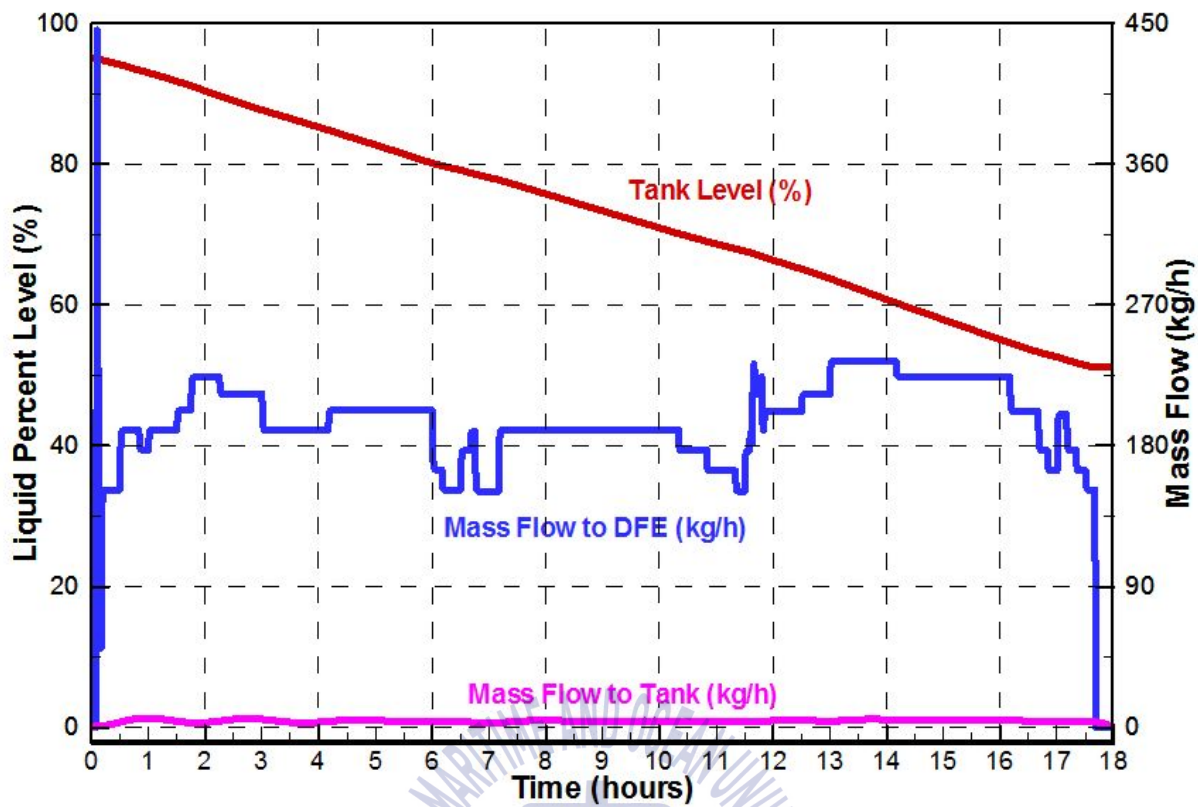


Fig. 4.11 Fuel supply system characteristic curve
(From Inchen to Gunsan)^[40]
- 67 -

(3) 에코누리호의 비상상황 예상

1) 운전 조건

에코누리호의 운항시 DF 엔진의 셧다운(shut down) 방법은 2 가지가 있다. 엔진으로 가스 공급중단과 주가스 밸브 셧다운으로 두 가지 방법이 있다. 에코누리호가 항해하던 중 가스누설(gas leak) 또는 제어밸브(control Valve)의 이상 등으로 GVU에서 트립(trip) 신호가 발생한 경우를 가정하였다. 이 경우 DF 엔진은 연료유 모드로 변환되며, 안전성은 공장시운전(shop test) 및 해상 시운전(sea trial)을 통하여 검증되었다. 따라서 여기에서는 가스 연료 시스템이 DF 엔진 셧다운 경우에 시스템의 공급 압력 변동, 공급 유량 변동, 탱크 압력 변동의 운전 특성을 분석하였다. Fig. 4.12는 에코누리호 비상상황 시에 탱크 레벨, 탱크 압력, 가스 유량, 공급 압력 변동을 나타낸 그래프이다.

2) 운전 특성 분석

100% 부하로 운전 10분 후 GVU의 셧다운으로 연료가 공급 중단되는 그래프이다. 본 그래프에 따르면 밸브의 셧다운으로 인하여 공급 압력이 급증하는 경향은 보이지 않는다. 특히 GVU 후단부터는 퍼지를 통하여 파이프라인 있는 가스는 대기로 방출하기 때문에 안전성은 확보된다고 할 수 있다. GVU 이전도 특별한 압력 변동이 없기 때문에 비상상황에서도 안전성 확인되었다.

Table 4.9는 공급 유량, 공급 압력, 탱크 압력에 대한 최대, 최소, 평균값을 보여준다.

Table 4.9 Summary of operation status at case 3				
	Max	Min	Average (consumption)	Remarks
Supply pressure	6.39 barg	6.09 barg	6.22 barg	
Supply flow	245.13 kg/h	151.79 kg/h	196.24 kg/h	except for 445.7 kg/h, 5.3 barg at GVU open condition
Tank pressure	6.50 barg	6.49 barg		

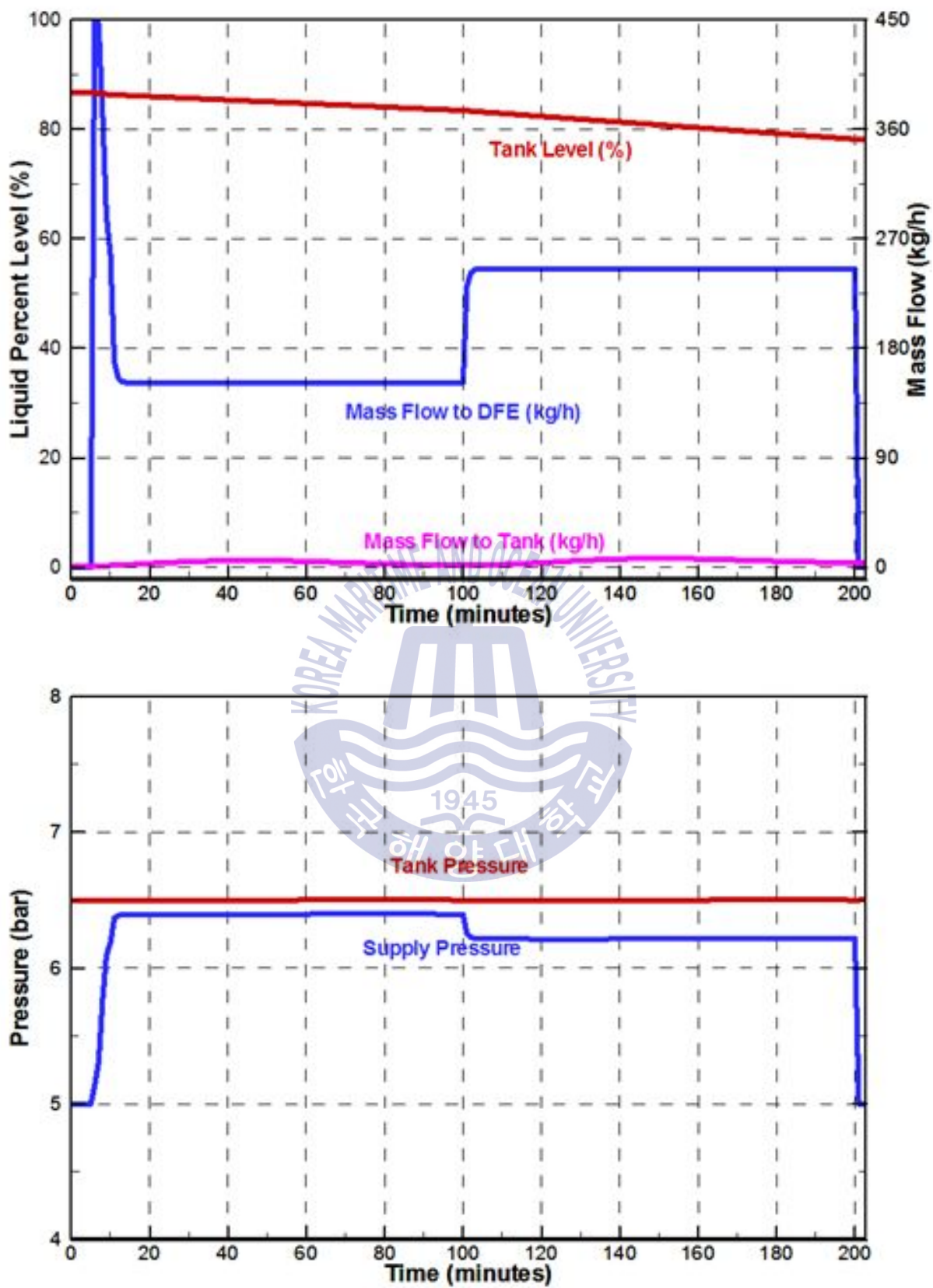


Fig. 4.12 Fuel supply system characteristic curve
(GVU shut down)

(4) 에코누리호가 항해 가능거리 추정

1) 운전 조건

에코누리호가 상용출력의 100% 또는 75% 부하로 항해를 수행할 경우 최대 항해거리가 얼마나 되는지 추정해 보았다. 이를 통하여 에코누리호의 항해 계획을 수립할 경우 참고 자료로 사용 되어 질 것으로 판단된다. Fig. 4.13, 4.14는 에코누리호 100%, 75% 부하 항해시, 탱크레벨, 탱크 압력, 가스 유량, 공급 압력 변동을 나타낸 그래프이다.

2) 운전 특성 분석

100% 부하 운전시 25 시간 운전이 가능하며 75% 부하 운전시 31시간 운전이 가능하다는 결과를 얻었다. 운항이 불가능하다고 판단한 지점은 설정유량보다 감소되는 지점까지로 하였다. 이를 통하여 100% 부하 운전시 694.5 km 정도 운항이 가능하며 75% 부하 운전시 781 km 운항이 가능하다. 따라서 가거도 (왕복 약 775 km) 까지도 운항이 가능하다는 결론이다. 이는 선체에 부착물이 없거나, 잔잔한 바다라는 조건에서 가능하다. 그러나 서해안 각 도서의 긴급물자 수송이 필요할 경우 투입이 가능하다는 사실을 확인 할 수 있었다.

Table 4.10, 4.11은 공급 유량, 공급 압력, 탱크 잔량 및 압력에 대한 최대, 최소, 평균값을 보여준다.

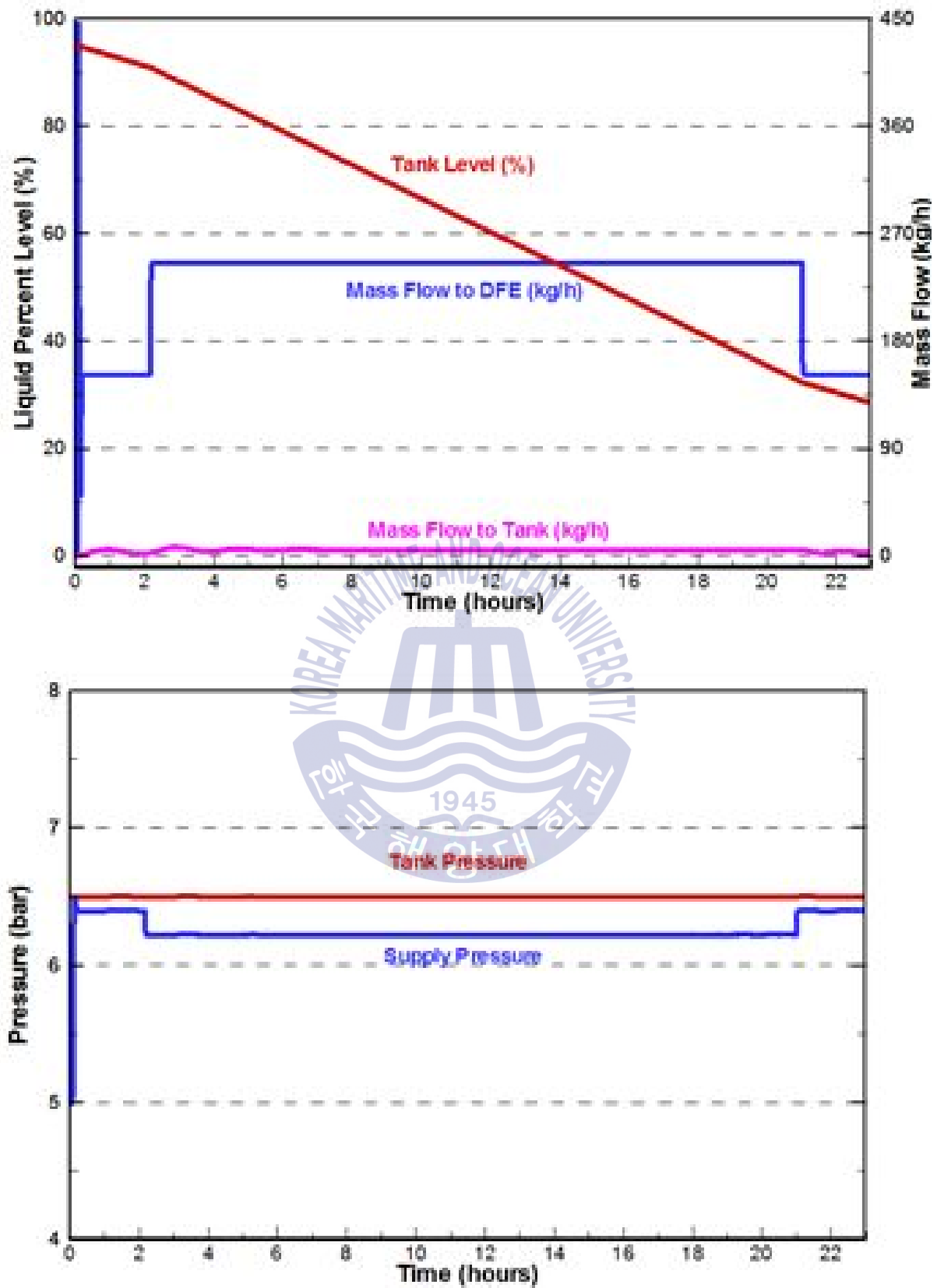


Fig. 4.13 Fuel supply system characteristic curve(100% load)

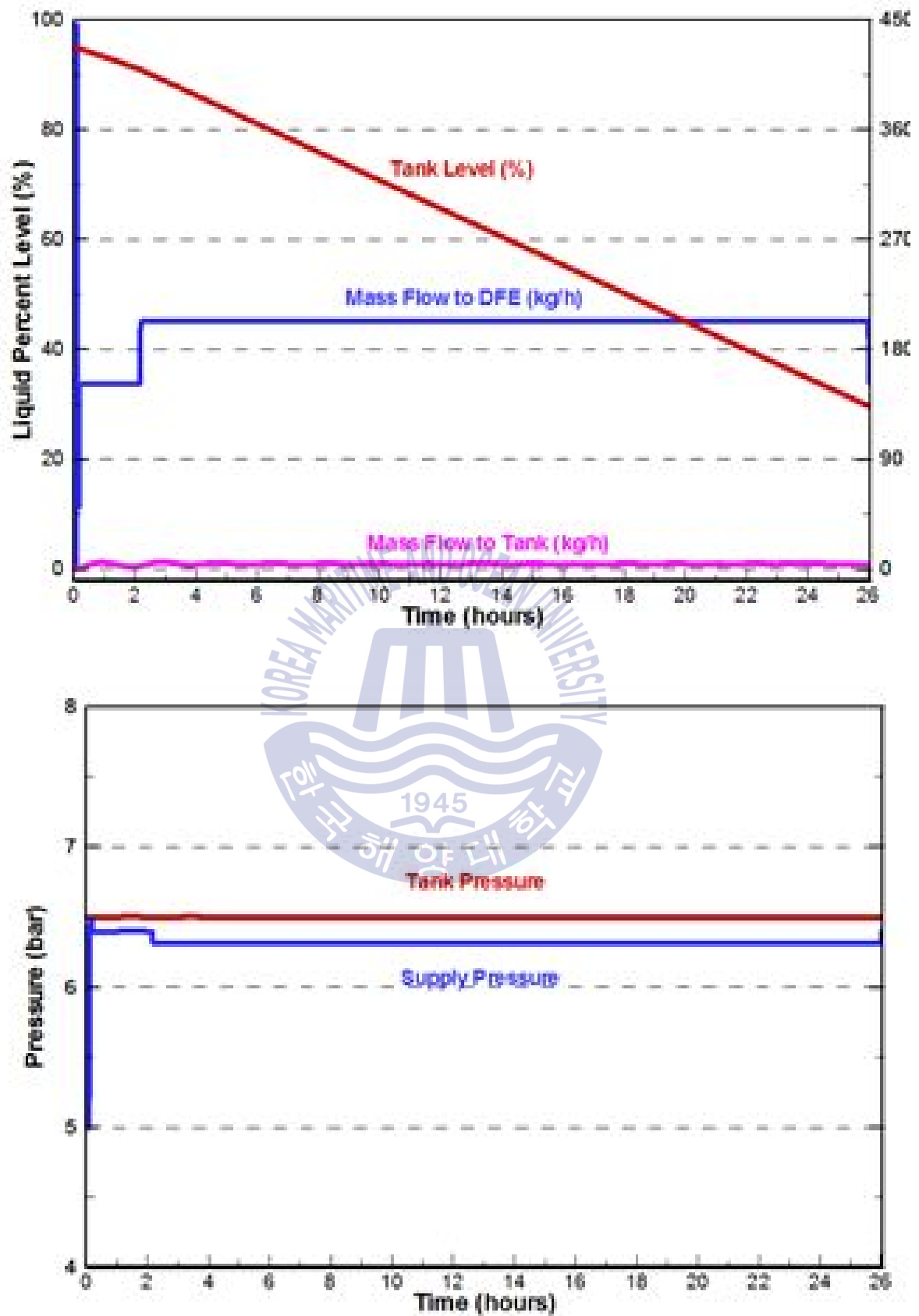


Fig. 4.14 Fuel supply system characteristic curve(75% load)

Table 4.10 Summary of operation status at 100% load				
	Max	Min	Average (consumption)	Remarks
Supply pressure	6.48 barg	6.21 barg	6.25 barg	
Supply flow	245.42 kg/h	139.38 kg/h	228.62kg/h	except for 445.7 kg/h, 5.3 barg at GVU open condition
LNG residual quantity	19 m ³	5.6 m ³	13.4 m ³	
Tank pressure	6.50 barg	6.49 barg		

Table 4.11 Summary of operation status at 75% load				
	Max	Min	Average (consumption)	Remarks
Supply pressure	6.48 barg	6.31 barg	6.32 barg	
Supply flow	202.72 kg/h	139.38 kg/h	198.41 kg/h	except for 445.7 kg/h, 5.3 barg at GVU open condition
LNG residual quantity	19 m ³	5.8 m ³	13.2 m ³	
Tank pressure	6.50 barg	6.49 barg		

제 5 장 결 론

저압 가스연료를 사용하는 에코누리호를 대상선박으로 연료 공급 시스템을 고찰 하였다. 4가지 운항패턴을 가정하여 압력, 온도, 유량, 및 탱크 용량의 변화들을 파악하고 운전 특성에 대하여 고찰해 보았다. 이를 통하여 저압가스 시스템이 실선에 적용되었을 경우 지니게 되는 운전 특성 및 안전성을 평가하였고, 안정적인 운항을 위한 병커링 시점을 예측하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 운항패턴 및 항해 가정을 통하여 섯다운, 급격한 부하 변동 등 연료의 유량과 압력이 급격하게 변화하는 상황에서도 안정적인 운전이 가능하다. 특히 가스를 공급하는 주 밸브가 섯다운 되더라도 허용 압력이상으로 증가되지 않고 안정적인 운항이 가능하다. 이를 통해서 저압가스연료를 사용하는 시스템의 안전성이 확보되어져 있다고 평가된다.

둘째, 항만 안내를 하는 항해시 가스 연료를 2.9% 정도 소모한다. 1회 40분 운항시 0.34m³ 정도이며, 탱크에 연료를 95 % 저장하는 경우에 22회 항만 안내 항해가 가능함에 따라 에코누리호의 병커링 사전계획 수립이 가능할 것으로 예상된다.

셋째, 항만 안내의 항해 이외 인천에서 가거도까지 추가적인 병커링을 하지 않고 자체 연료로 임무 수행이 가능한 것으로 평가되었다. 따라서 필요에 따라 에코누리호가 황해의 각 도서지방에 물자 이송 등의 임무 수행이 가능하다.

본 연구를 통해서 저압가스 연료 시스템의 운전특성인 시스템 압력, 온도, 유량이 시뮬레이션을 통하여 안정적으로 운용이 가능하다고 판단된다.

최근 대형 선박에 LNG를 연료로 사용하는 저압 2행정 기관의 연료 공급 시스템 또한 본 선박과 유사한 형태로써 저압 가스 연료 시스템이 안정적으로 운용

이 가능하다고 유추해 볼 수 있었다. 이를 통하여 중소형 선박의 저압 LNG 연료 추진선박의 병커링 시점 산정, 시스템 안전성 평가를 위한 참고 자료로 활용될 것으로 판단된다. 본 연구는 HYSYS라는 시뮬레이션 프로그램을 통하여 연구를 수행하였으며 실선 또는 타선과의 비교 검증을 통한 추가 연구가 필요할 것으로 사료 된다.



참고문헌

- [1] 산업통상자원부, 2015, 「LNG 연료추진선박 포럼」 p.31.
- [2] 조권희 외 4명, 2012, 「선박용 디젤엔진의 배기 저감기술 및 계측」 pp. 65-67.
- [3] 조권희 외 4명, 2012, 「선박용 디젤엔진의 배기 저감기술 및 계측」 pp. 121-122.
- [4] 조권희 외 4명, 2012, 「선박용 디젤엔진의 배기 저감기술 및 계측」 pp. 65-67.
- [5] 조권희 외 4명, 2012, 「선박용 디젤엔진의 배기 저감기술 및 계측」 p. 75.
- [6] 박정규, 2010, 「선박용 디젤엔진의 배기가스 저감기술 및 배출량 계산에 관한 연구」. 석사학위 논문. 부산:한국해양대학교. p. 40.
- [7] MDT, 2015, 「Emission Project guide」, technical paper p. 14.
- [8] 조권희 외 3명, 2013, 「대학생을 위한 기관실 자원관리」 pp. 334-335.
- [9] MDT, 2015, 「Low speed engines」/Eco seminar
- [10] MDT, 2015, 「Emission Project guide, technical paper」 p. 43, p. 45.
- [11] 조권희 외 3명, 2013, 「대학생을 위한 기관실 자원관리」 p. 341.
- [12] Wartsila Moss AS, 2015, 「Presentation for exhaust gas cleaning systems」 p. 16, p 19.
- [13] 신윤미, 2013, 「선박용 폐열회수시스템의 적용에 관한 연구」. 석사학위 논문. 부산:한국해양대학교. p. 4

- [14] DNV, 2013, 「Introduction and regulation」 Shipping CO₂ emissions, p.11
- [15] IMO, 2011, 「Calculation of parameters for determination of EEDI reference values」 MEPC 62nd session, p.2
- [16] 조권희 외 3명, 2013, 「대학생을 위한 기관실 자원관리」 pp. 361-362.
- [17] 조권희 외 3명, 2013, 「대학생을 위한 기관실 자원관리」 p. 364.
- [18] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 13
- [19] Small scale LNG market trends in Europe, gas LNG Europe, Kwinten Standaert, 3rd annual ssLNG forum, Nov.5, 2014, Rotterdam
- [20] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 191
- [21] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 194
- [22] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 196
- [23] 이재무, 2015.3.27, The present and the future of gas fuelled ship business, LNG 연료추진선박 포럼(기술현황과 발전전략), p.91.
- [24] 이강기, 2015.6.15., 중소형 LNG plant 선진기술 동향조사 보고서, KOSME2015, p.24.
- [25] LNG for shipping-Current status, MarTech LNG 18th Sep 2013, Claus Winter Graugaard, head of customer service & business development, DNV
- [26] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 78
- [27] MDT, 2015, 「Alternate Fueled Engine development and experience」, p.8

- [28] ACO, 2015, 「FUEL Supply pumps-LNG」, p.9
- [29] 산업통상자원부, 2015, 「LNG 연료추진선박 포럼」 p.53
- [30] 조권희, 2014, 「선박기관특론」, p. 250
- [31] SIMS, 2011, 「Development of large size LNG fueled ships」, Seoul International Maritime and Shipbuilding Conference 2011, p.17
- [32] 조권희, 2014, 「선박기관특론」, p. 251
- [33] IMO, 2014. 「DRAFT INTERNATIONAL CODE OF SAFETY FOR SHIPS USING GASES OR OTHER LOW-FLASHPOINT FUELS (IGF CODE) Draft IGF Code」, pp. 17-53.
- [34] ClassNK, 2014, LNG-Fueled Vessel Technologies Seminar, pp. 20-21.
- [35] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 152.
- [36] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 165.
- [37] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 170.
- [38] 강호근, 2015, 「Technologies for Gas Fuelled Ship & LNG Bunkering」, p. 246.
- [39] 강호근, 2015. 「NGH 수송선의 하역 공정시스템 해석 및 평가」, 연구보고서. 부산:한국해양대학교, pp. 19-27.
- [40] 천정민, 정문화, 강호근, 김유탉, 조권희, 2015, 「소형 LNG연료 추진선박의 부하조건에 따른 가스연료공급시스템의 운전 특성 검토」 해양환경안전학회 2015년도 추계학술발표회 논문집

- [41] 정문화, 천정민, 강호근, 김유탉, 조권희, 2015, 「DF엔진이 탑재된 LNG연료 추진 선박의 운전조건에 따른 연료소모량 산정에 대한 평가」 한국마린엔지니어링학회 2015년도 후기학술대회 논문집
- [42] 김태훈, 강호근, 김유탉, 정문화, 2015, 「LNG연료 추진선박의 연료공급시스템에 대한 동특성 평가」 한국마린엔지니어링학회 2015년도 전기학술대회 논문집



감사의 글

졸업한지 20 여 년 동안 산업 현장에서 많은 부분을 배우고 경험을 쌓았지만, 기초 학문에 대한 지식이 많이 부족하다는 생각을 했습니다. 학부 생활하면서 4년 동안 열심히 하지 못했던 지난 기억들도 있어서 학업을 병행하기에는 어려운 상황이었지만 대학원 진학을 결정하여 학업을 시작 하였습니다. 지난 2년 동안 수업을 듣고, 다양한 경험을 가진 여러 동료들이 가지고 있는 지식, 경험을 공유했던 시간들은 오랫동안 소중하게 마음속 깊이 간직할 수 있을 것 같습니다. 친환경 기술 관련 내용에 관심이 많았는데 수업을 통해서 많은 지식과 정보를 얻을 수 있는 좋은 기회였던 것 같습니다.

논문을 완성하는 과정이 많이 힘들었지만 도와주신 모든 분들께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 바쁘신 중에도 논문의 완성을 위해 따듯한 애정과 관심으로 지도하여 주시고 격려하여 주신 조권희 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 바쁘신 중에도 논문 심사를 맡아 주신 최재성 교수님께도 감사를 드리며, 가스 연료 시스템의 해석 관련해서 많은 자료와 도움을 주신 강호근 교수님께도 감사를 드립니다.

또한, 본인일도 많이 바쁘는데 논문 자료 및 학회 발표하는데 많은 도움을 주신 천정민 연구원께도 감사의 말씀을 드리고, 초기에 논문 준비에 도움을 주신 강호근 교수연구실의 김태훈씨, 같이 학위 논문 준비하면서 여러 가지로 도와주신 김보람 대학원생에게도 감사 말씀을 드립니다. 연료전지의 기초 개념을 이해하는데 많은 도움을 주신 김명환 교수님께도 감사를 드립니다. 논문을 완성하는데 무언의 지지와 많은 격려를 해준 친구 신오관, 박상범 검사관등 여러 친구, 동료들에게도 고맙다는 말 전합니다.

마지막으로, 지난 3년 동안 학업 및 논문을 완성하는데 묵묵히 옆에서 응원하고 격려해준 사랑하는 아내, 군 복무중인 아들 치현이, 딸 가연이에게도 고맙다는 말을 전합니다.